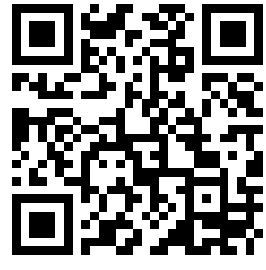
This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

Google™ books

https://books.google.com



Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

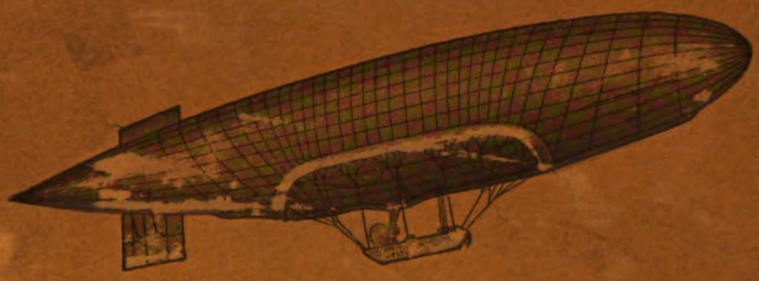
B 735,219

Jahrbuch

der

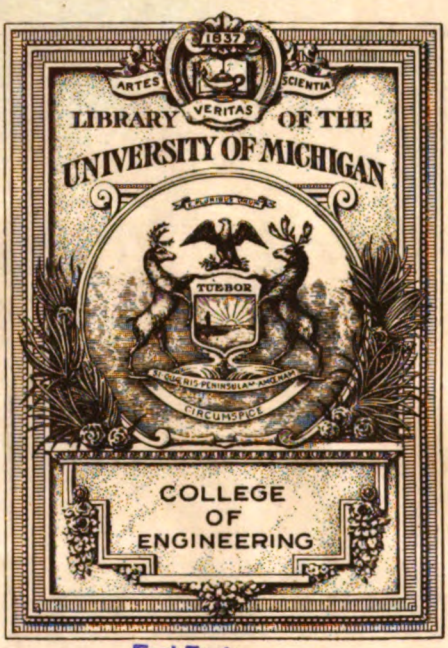
Luft-Fahrzeug-Gesellschaft

(früher der Motorluftschiff-Studiengesellschaft).



Sechster Band. 1912—1913.

Digitized by Google



East Engin.
Library

Digitized by Google

East Eng. Lib
TL
503
.L95
J3

Digitized by Google

Digitized by Google

Jahrbuch

der

Luft-Fahrzeug-Gesellschaft

(früher der Motorluftschiff-Studiengesellschaft).

Sechster Band.

1912—1913.

Mit 91 Textfiguren und 1 Tafel.

Berlin.
Verlag von Julius Springer.
1913.

Digitized by Google

Universitäts-Buchdruckerei von Gustav Schade (Otto Francke), Berlin und Bernau.

Digitized by Google

Inhaltsverzeichnis.

Berichte und wissenschaftliche Abhandlungen.

Seite

Übersicht über die Luftschiffe der europäischen Großstaaten 1
Funkentelegraphie und Luftschiffahrt. Von Graf Arco, Berlin 9
Über die Spannungsverteilung auf den Hüllen von Prall-Luftschiffen. Von Karl Heyer, Bad Dürkheim 25
Bericht über die Göttinger Modellversuchsanstalt. Von Professor Dr. L. Prandtl, Göttingen 73
Systematische Versuche an Luftschrauben-Modellen. Von Dipl.-Ing. Alb. Betz, Göttingen 83
Über die Beanspruchung von Ballonhüllen unstarrer Luftschiffe. Von Major z. D. Professor Dr.-Ing. h. c. v. Parseval, Berlin 151
Der Nebelbeobachtungsdienst der Luft-Fahrzeug-Gesellschaft m. b. H. Von Dr. Hermann Rotzoll, Bitterfeld 163
Tabellen: Nr. 1. Zeppelin-Luftschiffe 167
Nr. 2. Parseval-Luftschiffe 169
Nr. 3. Die übrigen deutschen Luftschiffe 171
Nr. 4. Die im Betrieb befindlichen Luftschiffe anderer Länder 172

Geschäftliches.

1. Aufsichtsrat 177
2. Personalveränderungen 177
3. Todesfälle 177
4. Betrieb 178
   a) Luftschiffe 178
   b) Flugzeuge 181
5. Die erzielten Fortschritte im Bau von Prall-Luftschiffen 183
   a) Die Hüllen der neueren Parseval-Luftschiffe. Von Dipl.-Ing. Naatz, Bitterfeld 183
   b) Die neueren Gondeltypen der Parseval-Luftschiffe. Von Ing. Blochmann, Bitterfeld 186
6. Die Werft der Parseval-Luftschiffe in Bitterfeld 191

364163

Digitized by Google

Digitized by Google

Berichte und wissenschaftliche Abhandlungen.

Übersicht über die Luftschiffe der europäischen Großstaaten.

Digitized by Google

Digitized by Google

In unserem Jahrbuch 1911/12 sind die verschiedenen deutschen Luftschiffsysteme sowie die gesamte Entwicklung der Motorluftschiffahrt in Deutschland einer eingehenden Besprechung unterzogen.

In dem vorliegenden Jahrbuch sei nur darauf hingewiesen, daß Deutschland seine führende Stellung gegenüber allen übrigen Staaten unbestritten behauptet hat. Fortschritte durch Steigerung der Eigengeschwindigkeit und Erhöhung der Betriebssicherheit sind sowohl beim starren wie beim unstarren System zu verzeichnen. Über „Die neueren Gondeltypen der Parseval-Luftschiffe" und „Die Hüllen der neueren Parseval-Luftschiffe" wird unter dem Kapitel „Die erzielten Fortschritte im Bau von Prall-Luftschiffen" ausführlich berichtet.

Verschiedene neue Projekte (Luftschiff Veeh, Unger, propellerloses Luftschiff) sind noch nicht so weit gediehen, daß über ihren Wert ein Urteil gewonnen werden kann.

Nicht besonders erwähnt sind in diesem Jahrbuch die kleinen europäischen und außereuropäischen Staaten, die über keine oder eine nicht nennenswerte eigene Luftschiffindustrie verfügen.

Eine Zusammenstellung sämtlicher fahrfähigen Luftschiffe der verschiedenen Länder mit allen wissenswerten Angaben findet sich in den Tabellen Nr. 1—4. Von den europäischen Großstaaten ist folgendes zu sagen:

England.

Trotz des lebhaften Interesses, welches die englische Heeres- und Marineverwaltung der Weiterentwicklung der Luftschiffahrt entgegenbringen, und trotz der erheblichen Mittel, die für diesen Zweck alljährlich bereit gestellt werden — in diesem Jahre hat England für das Armee-Luftfahrwesen 10¼ Millionen Mark in den Etat eingestellt —, sind wesentliche Fortschritte auf dem Gebiete der Luftschiffahrt auch in diesem Jahre in England nicht zu verzeichnen. Von den im eigenen Lande gebauten Luftschiffen haben sich nur die beiden kleinen, 2000 bzw. 3400 cbm fassenden Luftschiffe Beta und Delta im ganzen gut bewährt. Sie sind im Verhältnis zu ihrer Größe schnell genug, genügen aber bezüglich ihrer Höhen- und Dauerleistung nicht den Ansprüchen, die bei uns an ein Kriegsluftschiff gestellt werden. Die englische Heeresverwaltung bevorzugt diesen kleinen, unstarren Luftschifftyp besonders für die Verwendung in den Kolonien. Die Versuche, für die englische Marine brauchbare Kriegsluftschiffe größeren Inhalts zu bauen, sind bisher fehlgeschlagen. Auch die aus Frankreich für die englische Marine bezogenen Luftschiffe haben sich nicht bewährt. Das 20000 cbm große Starrluftschiff „Mayfly" und das 10000 cbm fassende Lebaudy-Luftschiff „Morning Post"

Digitized by Google

wurden im Jahre 1911 zerstört. Ein gleiches Schicksal erlitt im verflossenen Berichtsjahre „Clement Bayard II", 7000 cbm groß, bekannt durch seine Dauerfahrt Paris—London am 16. Oktober 1912. Das neueste aus Frankreich bezogene Marineluftschiff „Astra Torres 3" befindet sich noch im Versuchsstadium. Schon im März d. J. war das Luftschiff abgeliefert. Seine erste Probefahrt, die völlig mißglückt ist, unternahm es am 12. Juni von Farnborough aus. Infolge starken Gasverlustes knickte die Hülle in der Mitte ein. Das Luftschiff kam so schnell zu Boden, daß die Gondel hart aufsetzte und stark beschädigt wurde. Eine Katastrophe wurde nur mit genauer Not vermieden. „Astra Torres 3" ist jetzt wieder abmontiert, an eine Wiederaufnahme der Fahrten wird wohl vorläufig nicht zu denken sein.

Die bereits im vorigen Jahrbuch ausgesprochene Erwartung, daß die englische Marineverwaltung, unzufrieden mit den Leistungen der eigenen und französischen Luftschiffe, ihr Interesse erneut dem deutschen Luftschiffbau zuwenden würde, hat sich nunmehr verwirklicht. Ein deutsches Parsevalschiff ist bereits an England abgeliefert worden.

Frankreich.

Nach Tabelle 4 besitzt Frankreich zurzeit nur 12 fahrfähige Luftschiffe. Ein Blick auf die Tabelle zeigt, daß auch von diesen Luftschiffen keines an die Leistungen der deutschen Heeresluftschiffe der Z.-, M.- oder P.-Klasse heranreicht. Sie sind vor allen Dingen nicht schnell genug und nur zum Teil als bedingt kriegsbrauchbar zu bezeichnen. Sämtliche in der Tabelle aufgeführten Luftschiffe sind ziemlich neu. 3 sind im Jahre 1911, 7 im Jahre 1912 und 2 im Jahre 1913 fertig gestellt. Alle sonst noch vorhandenen französischen Luftschiffe, die zum Teil in Fachzeitschriften noch als brauchbar verzeichnet werden, sind entweder völlig verbraucht oder bereits abmontiert. „Astra Torres 1", „Adjutant Reau", „Eclaireur Conté", drei der neueren Luftschiffe, mit einer Geschwindigkeit von ca. 15—16 m/sec, sind bei einem Brande einer großen Luftschiffhalle der Astrawerke in Issy bei Paris durch Feuer zerstört oder so stark beschädigt, daß sie unbrauchbar geworden sind.

Das bisher erfolgreichste französische Luftschiff, der „Fleurus", ist unstarrer Bauart und dem Parsevalsystem anscheinend recht stark „nachempfunden". Dieser, „dirigeable le plus rapide" besitzt eine Geschwindigkeit von 16 m/sec. Voraussichtlich aber werden „Commandant Coutelle" und „Spieß", die sich beide noch im Versuchsstadium befinden, mit ihren ca. 400 PS betragenden motorischen Kräften die bisher erreichte Geschwindigkeit von 16 m/sec übertreffen.

Das erste französische starre Luftschiff „Spieß" hat am 30. April und 2. Mai d. J. seine beiden ersten Versuchsfahrten unternommen. Die Ergebnisse dieser beiden ersten Fahrten, welche in erster Linie der Erprobung der Steuerung, insbesondere der dynamischen Höhensteuerung dienten, sollen befriedigt haben. Allerdings vermied es der sehr vorsichtige Führer, Graf de la Vaulx, große Höhen aufzusuchen und blieb in der Nähe des Aerodroms von St. Cyr, wo das Luftschiff stationiert ist. Der „Spieß" ähnelt in seiner äußeren Form sehr unseren Z.-Schiffen. Das Gerippe, im Gegensatz zu unseren Z.-Schiffen aus Holz und nicht aus Aluminium gefertigt, ruht auf einem dreieckigen, mit Stoff überzogenen Kiel, der als Lauf-

Digitized by Google

gang dient und nur durch die zwei freihängenden Gondeln unterbrochen wird. Der gesamte Gasinhalt von 12 800 cbm verteilt sich auf 14 Gaszellen, von denen 9 Zellen je 1200, 5 Zellen je 400 cbm Gas enthalten. Ganz ähnlich wie bei unseren Z.-Schiffen ist die Vorrichtung für die Ausfahrt aus der Halle bzw. die Einfahrt in die Halle. Gleise führen etwa 100 m weit ins Vorgelände. Die schweren Wagen, die auf diesen Gleisen laufen, halten das Schiff mittels Seilen in der gewünschten Lage fest.

Der „Commandant Coutelle" unternahm in St. Cyr am 8. Mai d. J. ebenfalls unter Führung des Grafen de la Vaulx seine erste etwa einstündige Probefahrt. L'Aérophile, das bekannte französische Fachblatt, äußert sich recht befriedigt.

„L'aéronaut paraît déjà d'après les résultats obtenus à sa première sortie devoir être extrêmement rapide."

Im Bau für die Heeresverwaltung befinden sich auf den verschiedenen französischen Luftschiffwerften zurzeit folgende 10 Schiffe:

1. Bezeichnung	2. Raum-inhalt cbm	3. Länge m	4. Größter Durch-messer des Trag-körpers	5. Motoren	6. Schrauben	7. Geschwindigkeit, angenommen von den Erbauern
Bauart der Fa. Astra, Société des constructions aéronautiques. Anciens établissements Surcouf, Billancourt (Seine).						
X.	12 000	98	14	2 Panhard-Levassor à 120 PS	2 zweiflügelige	16 m/sec
Astra Torrès 2	17 000	115	15,5	4 Panhard-Levassor à 250 PS	8 „	18 „
Astra Torrès 4	20 000	120	16	4 Panhard-Levassor à 250 PS	8 „	18 „
Bauart Établissement d'Aéronautique militaire.						
Nr. 2	17 000	110	15	4 Clément-Bayard à 250 PS	8 zweiflügelige	18 m/sec
Bauart der Usines Clément-Bayard in Levallois-Perres (Seine).						
Clément-Bayard 7	17 000	110—115	15	4 Clément-Bayard à 250 PS	8 zweiflügelige	18 m/sec
Bauart Ateliers Lebaudy-frères in Moissons (Seine et Oise).						
Lebaudy-Julliot 10	10 000	103	14,5	2 Panhard à 80 PS	2 zweiflügelige	12,5 m/sec
Lebaudy-Julliot 11	17 100	110	15,5	4 Panhard à 250 PS	8 „	18 „
Bauart Zodiac. Société Française de ballon dirigeable in Puteaux, Konstruktion Mallet.						
Zodiac 14	10 000	95	13,5	2 Panhard	2 zweiflügelige	16 m/sec
„ 15	10 000	95	13,5	2 Panhard	2 „	16 „
„ 16	17 000	110	15	4 Panhard	8 „	18 „

Ein Vergleich dieser im Bau befindlichen mit den in Tabelle 4 aufgeführten französischen Luftschiffen ergibt, daß Frankreich zum Bau erheblich größerer, mit weit stärkeren motorischen Kräften ausgerüsteter Luftschiffe übergegangen ist. Die von den Erbauern angenommenen Geschwindigkeiten von 16—18 m/sec können mit diesen Luftschiffen sehr wohl erreicht, wenn nicht übertroffen werden.

Digitized by Google

Zurzeit verfügt allerdings Frankreich noch über keine Hallen, die zur Aufnahme derartiger Luftschiffe geeignet wären. Von den vorhandenen 17 Luftschiffhallen sind die meisten wenig standhafte Holzbauten und nicht über 80—90 m lang.

Verschiedene Mißstände scheinen zurzeit infolge mangelhafter Organisation in der französischen Herresluftschiffahrt zu herrschen. In den Nr. 5 und 6 des „Flug-Sport", Jahrg. 1913, werden in einem ausführlichen Aufsatz die in Frankreich herrschenden Zustände eingehend erörtert.

Italien.

Das wachsende Interesse der italienischen Heeresverwaltung für ihre Luftflotte findet seinen Ausdruck in einer großzügigen Ausrüstung von Heer und Marine mit Luftschiffen und Flugzeugen, sowie in der planvollen und zielbewußten Durchführung einer mustergültigen Organisation. In der Nr. 1 der „Luft-Flotte" und in den Nr. 12, 13 und 14 „Deutsches Offiziersblatt" wird der Stand der italienischen Heeresluftfahrt einer ebenso ausführlichen wie interessanten Besprechung unterzogen. Als besonders erwähnenswert sei hier nur folgendes angeführt: Während Italien bisher nur den größten Teil seiner Luftschiffe auf eigenen Werften baute, Flugzeuge und Motoren dagegen vom Auslande, vorzugsweise aus Frankreich bezog, geht es jetzt daran, sich auch auf dem Gebiete der Motoren- und Flugzeugindustrie unabhängig vom Auslande zu machen. Die einheimische Industrie, durch zahlreiche, gut dotierte Wettbewerbe angeregt und gefördert, dürfte binnen kurzem in der Lage sein, den Anforderungen der Heeresverwaltung bezüglich der Lieferung von Flugzeugen und Motoren vollkommen zu genügen. Erzeugnisse der ausländischen Flugzeug- und Motorenindustrie werden nur noch zugelassen, wenn die betreffende Firma eine eigene Fabrik in Italien selbst errichtet hat.

Vorbildlich ist die gediegene wissenschaftliche und praktische Ausbildung der Offiziersflieger unter Heranziehung geeigneter wissenschaftlicher Institute. Die gesamte Ausbildung gliedert sich in drei Teile und dauert etwa fünfzehn Monate. Während des ersten, drei Monate umfassenden Teils, wird den Offizieren Gelegenheit gegeben, sich durch Hörsaalunterricht, verbunden mit praktischen Übungen, die für den Flieger durchaus notwendigen Fachkenntnisse anzueignen. Der zweite Teil dient der praktischen Ausbildung und endet mit der Erwerbung des ersten Pilotenzeugnisses. Mit der Ablegung der recht schwierigen Feldpilotenprüfung endigt der dritte und letzte Teil der Ausbildung.

Die italienischen Heeres- und Marineluftschiffe werden von den Werkstätten der Brigata Specialisti nach den Erfahrungen von Fornalini, Crocco, Ricaldoni und de Fabbro hergestellt. Sie sind halbstarrer Bauart und besitzen im Innern der Hülle ein elastisches, gewissermaßen als Rückgrad dienendes Gerippe, das sich nach dem Entleeren des Luftschiffes flach auf den Boden legt. Dieser Typ der halbstarren Bauart hat sich gut bewährt und findet für sämtliche italienischen Heeresluftschiffe Anwendung. Die Herstellung erfolgt in drei Größen: P. (Piccolo = klein), M. (Medio = mittel), G. (Grande = groß). Ausweislich der Tabelle 4 besitzt Italien zurzeit, außer einigen älteren Luftschiffen, 5 Luftschiffe der P.-Klasse und 2 der M.-Klasse, die außer dem Marineluftschiff M. I sämtlich der Heeresver-

Digitized by Google

waltung gehören. Der weitere Ausbau ist derart geplant, daß die Heeresverwaltung insgesamt 5 P.- und 5 M.-Schiffe, die Marineverwaltung 5 M.- und 5 G.-Schiffe erhalten soll. Von den G.-Schiffen sind bis jetzt nur die Konstruktionszeichnungen fertig gestellt. Sie werden einen Rauminhalt von ca. 20 000 cbm erhalten und mit motorischen Kräften von ca. 1000 PS ausgerüstet sein. Man erwartet, daß diese Schiffe eine Eigengeschwindigkeit von ca. 25 m/sec erreichen werden.

In Baggio bei Mailand geht das Luftschiff „Citta di Milano" seiner Vollendung entgegen. Bei 12 000 cbm Inhalt hat das Luftschiff eine Länge von 72 m und einen Durchmesser von 18 m. Es ist ausgerüstet mit 2 Motoren zu je 80 PS. Die Geschwindigkeit soll 15—16 m/sec betragen. Die Mittel für den Bau dieses Luftschiffes wurden durch eine unter dem Protektorat des Königs von Italien stehende Subskription aufgebracht. Von der Luft-Fahrzeug-Gesellschaft m. b. H. erwarb die italienische Heeresverwaltung im Herbst v. J. ein Parseval-Luftschiff von 9600 cbm Inhalt.

Nach Durchführung dieser Baupläne wird Italien über eine wohl organisierte, sowohl an Zahl als auch an Brauchbarkeit erstklassige Luftflotte verfügen.

Österreich-Ungarn.

Österreich-Ungarn, dessen Interesse im verflossenen Jahr vorzugsweise dem Flugzeugbau zugewandt war, hat neue Luftschiffe weder im Lande selbst gebaut noch vom Auslande bezogen. Von den der Heeresverwaltung gehörigen 4 Luftschiffen ist zurzeit nur das bereits im Jahre 1909 gebaute Parseval-Luftschiff (M. I) als diensttauglich zu bezeichnen. Die Hüllen von M. II (Lebaudy) und Bömches sind, da sie unbrauchbar waren, zerschnitten worden und haben anderweitige Verwendung gefunden. M. III (Körting), dessen Leistungen nicht befriedigen, wird einem umfassenden Umbau unterzogen und erhält eine neue Hülle. Das Luftschiff Stagel-Mansbarth, dessen gute Leistungen wir bereits im vorigen Jahrbuch erwähnten, ist in den Besitz der österreichischen Luftverkehrsgesellschaft übergegangen und wird unter dem Namen „Austria" zu photogrammetrischen Aufnahmen von Teilen Niederösterreichs nach dem Verfahren des verstorbenen Hauptmanns Th. Scheimpflug benutzt werden. Dozent Dr. Peuker und Ingenieur Kammerer werden die Arbeiten leiten.

Rußland.

Das auf der russischen Staatswerft in Ischowsk gebaute Luftschiff „Albatros" von 10 000 cbm Inhalt, welches wir bereits am Schluß dieses Kapitels in unserem letzten Jahrbuch erwähnten, hat sich keiner langen Lebensdauer erfreut. Es ist im Dezember 1912 geplatzt. Der erste Versuch Rußlands, auf eigener Werft ein brauchbares größeres Luftschiff eigener Konstruktion zu bauen, ist somit fehlgeschlagen. Welche Leistungen das auf der Baltischen Werft in Riga erbaute Luftschiff „Kowanko" aufzuweisen hat, ist bisher nicht bekannt geworden. Neuerdings scheint man in Rußland ernsthaft an den Bau eines starren Luftschiffes von ca. 6000—7000 cbm herangehen zu wollen, dessen Erfinder der Ingenieur

Digitized by Google

Kostewitsch ist. Das Gerüst soll aus „Aborit", einem Holz hergestellt werden, das durch seine eigenartige Bearbeitung nicht nur sehr leicht, sondern auch äußerst haltbar ist. Ob der Versuch, ein derart kleines starres Luftschiff zu bauen, Erfolg haben wird, erscheint nach den bisherigen Erfahrungen allerdings recht zweifelhaft.

Außer den noch nicht in Dienst gestellten 2 französischen Luftschiffen „Astra Torres 13" und „Clement Bayard VI" — sie wurden im verflossenen Berichtszeitraum in Auftrag gegeben und erledigen zurzeit ihre Probefahrten — besitzt Rußland ausweislich der Tabelle Nr. 4 zurzeit 11 fahrfähige Luftschiffe. Als kriegsbrauchbar sind von diesen eigentlich nur die beiden Parseval-Luftschiffe, P. L. 7 und P. L. 14 zu bezeichnen. Alle übrigen, entweder aus Frankreich bezogenen oder nach dem französischen Astratyp in Rußland gebauten Luftschiffe genügen mit ihren 12—14 m/sec betragenden Geschwindigkeiten nicht den Ansprüchen, die an ein kriegsbrauchbares Luftschiff heute gestellt werden.

Besseren Erfolg als die russische Luftschiffindustrie scheint die Flugzeugindustrie des Landes gezeitigt zu haben. Die einheimischen Aeroplane, namentlich die in Riga gebauten, sollen den ausländischen nicht nachstehen. Sie sind allerdings vorläufig noch teurer als die ausländischer Herkunft.

Digitized by Google

Funken-Telegraphie und Luftschiffahrt.

Von
Graf Arco-Berlin.

Digitized by Google

Digitized by Google

Die beiden jüngsten Kinder unserer modernen Technik, drahtlose Telegraphie und Luftschiffahrt, die dem 20. Jahrhundert den Stempel aufzudrücken berufen sind, stehen von Anbeginn an in Deutschland in engen wechselseitigen Beziehungen zueinander. Diese resultieren in erster Linie aus den vielfachen gemeinsamen Berührungspunkten beider und einer inneren Verwandschaft insofern, als ihr Arbeitsfeld der weite Ozean des Luftmeeres ist, von dessen Tücken und Launen beide in gleichem Maße abhängig sind, und bei dessen Forschung und Eroberung die eine die Hilfe der anderen nicht entbehren kann. So ist es denn auch erklärlich, daß dieselben amtlichen Stellen und Persönlichkeiten, deren Tätigkeit wir den hohen Stand der militärischen Luftschiffahrt in Deutschland verdanken, von vornherein zu den deutschen Pionieren der Funkentelegraphie in engste Fühlung traten und die Bestrebungen der mit diesen Forschungen liierten Gesellschaften tatkräftig unterstützen.

Die Einführung funkentelegraphischer Stationen an Bord von Luftschiffen, und zwar hauptsächlich von Lenkballons, ist erst in den letzten Jahren erfolgt. Vorher begnügte man sich mit der Ausrüstung solcher Luftfahrzeuge mit einer Empfangseinrichtung, scheute sich aber, eine Sendereinrichtung an Bord zu nehmen. In erster Linie war es die Explosions- und Feuersgefahr, welche zu dieser Zurückhaltung führte; aber gerade die Abgabe von Nachrichten von Bord des Fahrzeuges nach der Erde hin war diejenige Aufgabe, welche für die Luftschiffahrt großen Nutzen bringen mußte, während umgekehrt die Nachrichtengebung nach dem Ballon eine geringe praktische Bedeutung hat. Die Feuersgefahr war einerseits bedingt durch die Funkenbildungen an der Senderapparatur und andererseits durch die großen Energiemengen und hohen elektrischen Spannungen, welche in den Senderantennen vorhanden sind. Die erstere Gefahr wird durch das neue System der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie, „tönende Löschfunken", vermindert, weil diese mit luftdicht abgeschlossenen Funkenstrecken arbeiten. Aber auch Verbesserungen in den Antennenanordnungen haben eine weniger gefährliche Benutzung ermöglicht. Die Antennen-Installation richtet sich natürlich nach den konstruktiven Einzelheiten der Luftfahrzeuge. Bei Lenkballons wird in der Regel ein Luftdraht aus der Gondel herabgelassen und die Metallteile der Gondel selber bilden das Gegengewicht hierfür.

Enthält die Gondel nicht genügend Metallteile und daher ungenügende Kapazität, so werden nach Beggerow als Antennen und Gegengewicht 2 verschieden lange parallele Drähte herabgelassen (s. Fig. 1). Der kurze Draht bildet mit einem Teil des längeren zusammen eine Art Lechersches System, wovon der überragende Teil des längeren die eigentliche strahlende Antenne ist.

Bei Aeroplanen wird meistens ein 50—100 m langer Luftdraht herabgelassen und von der Flugmaschine durch den Raum gezogen, wobei er eine fast horizon-

Digitized by Google

tale Stellung einnimmt. Es bestehen natürlich erhebliche Schwierigkieten, diesen Draht so anzubringen, daß er einerseits die Fluggeschwindigkeit durch Luftreibung wenig beeinträchtigt, andererseits aber auch bei den Kurven kein schädliches Kippmoment verursacht und schließlich bei einer plötzlichen Landung den Flieger nicht gefährdet. Bei Flugmaschinen werden ebenfalls die Metallteile der Maschine und des Drahtgestelles als elektrisches Gegengewicht benutzt.

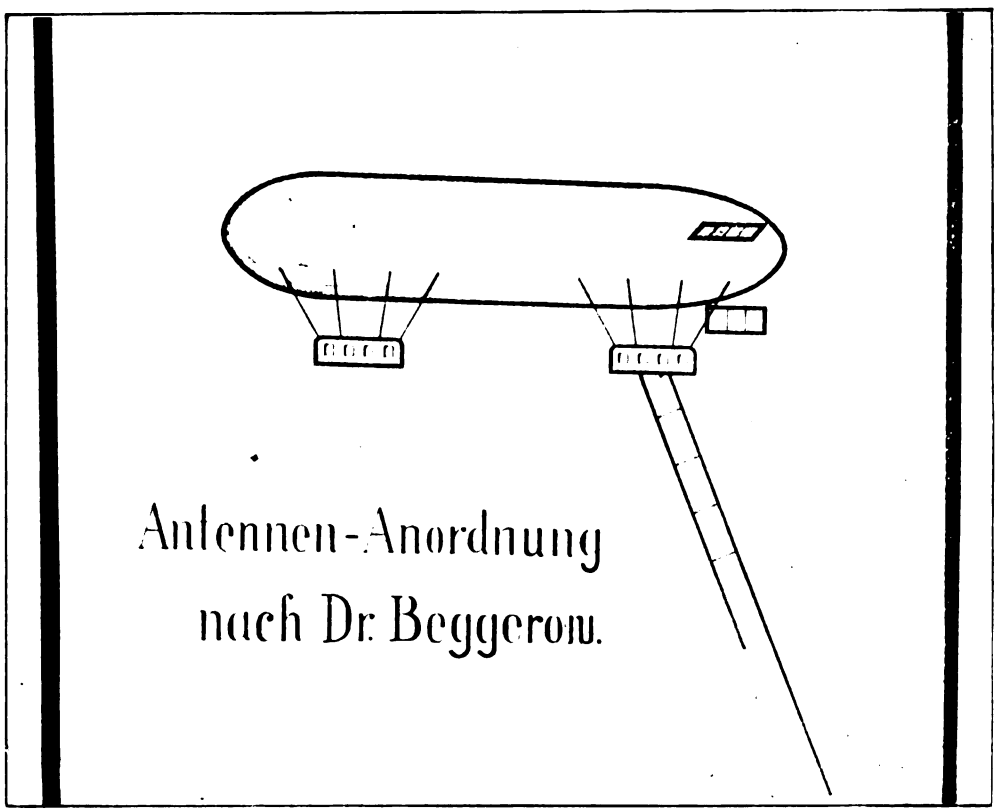


Fig. 1. Luftleiter-Anordnung für Lenkballons.

Bei Freiballons wird der Luftdraht 100 oder mehrere hundert Meter aus der Gondel senkrecht herabgelassen und als Gegengewicht der Ballonkörper mit einem leitenden Netz umgeben. Dieses dürfte auch einen gewissen Schutz gegen statische Ladungen und gleichzeitig bei der Landung gegen die sehr gefürchteten Gasentzündungen gewähren. Die Luftdrahtlänge kann hier erheblich größer gewählt werden als beim Motorballon oder dem Aeroplan, und es sind daher mit relativ kleinen Senderenergien große Reichweiten zu erzielen.

Die Luftschiffstation nach dem System Telefunken.

Den Raumverhältnissen in den Gondeln der Luftschiffe Rechnung tragend, sind die radiotelegraphischen Apparate der Luftschiffstationen in einem Schrank untergebracht, der durch eine vertikale Wand in eine offene vordere und eine ge-

Digitized by Google

schlossene hintere Hälfte abgeteilt ist. In der vorderen offenen Hälfte befinden sich alle von Hand zu bedienenden Einzelapparate des Senders und Empfängers, während in der hinteren geschlossenen Hälfte diejenigen Teile des Senders eingebaut sind, die keiner Wartung und Beobachtung bedürfen (Fig. 2). Auf den Schrank ist auf Porzellanisolatoren eine Haspel aufmontiert, auf der ein Luftdraht von ca. 200 m Phosphorbronzelitze aufgewickelt ist. Die Haspel ist mit stark isolierter Kurbel, Sperrklinke, Bremse, Zählerwerk und Laufrad versehen. An der rechten Außenseite befinden sich die Klemmanschlüsse für die Stromquelle und die Stationsbeleuchtung. Die äußeren Abmessungen des Schrankes sind 660 × 330 × 1350 mm. Als Antenne dient die auf der Haspel aufgewickelte Bronzelitze von 3 mm Durchmesser, die vermittels der isolierten Handkurbel der gewählten Wellenlänge entsprechend abgekurbelt und durch passend angeordnete isolierte Laufräder über den Bord der Gondel frei schwebend herabgelassen wird. Ein Luftdrahtumschalter, der im Schrank untergebracht ist, bewirkt in der Senderstellung ein Blockieren der Empfangsapparate und in der Empfangsstellung dasselbe für die Stromquelle, so daß durch unbeabsichtigtes Niederdrücken der Taste beim Empfang die empfindlichen Teile des Empfängers nicht gefährdet werden. Das Gegengewicht wird, wie eingangs erwähnt, von den Metallteilen der Gondel usw. gebildet.

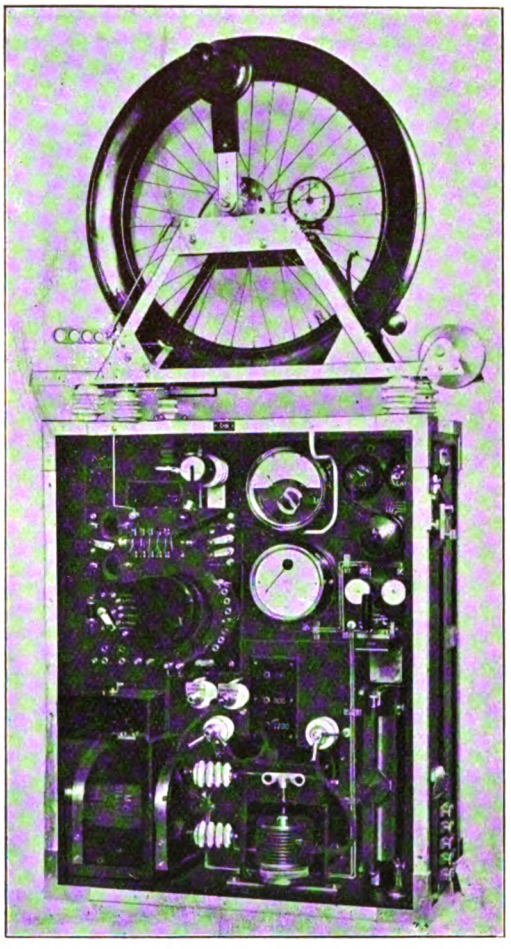


Fig. 2. Luftschiffstation System „Telefunken."

Als Stromquelle kommt eine Wechselstrommaschine mit angebauter Erregerdynamo zur Verwendung, deren Leistung bei ca. 3000 Touren pro Minute und einer Periodenzahl von 500 pro Sekunde ca. 500 Watt beträgt. Der Antrieb erfolgt durch den Motor des Luftschiffes, entweder durch Ketten- oder Riemenübertragung oder durch ein Vorgelege mit lösbarer Kuppelung. Die Senderapparatur besteht aus einem Transformator, Löschfunkenstrecke, Erregerkapazität, Erregerselbstinduktion, Luftdrahtverlängerungsspule, Amperemeter, Taste und Umschaltvorrichtung für 3 verschiedene Wellenlängen. Kapazität, Selbstinduktion und Verlängerungsspule befinden sich in der hinteren verschlossenen Hälfte des Schrankes, die übrigen Teile sind in übersichtlicher und leicht zugänglicher Weise in der vor-

Digitized by Google

deren Hälfte angeordnet. Der Erregerkreis läßt sich auf mehrere Wellen, die im Bereiche von 300—1200 m liegen, abstimmen. Fährt das Luftschiff in geringerer Höhe, kommen natürlicherweise nur kleinere Wellenlängen in Frage, da für die größeren Wellenlängen der Luftdraht zu weit abgekurbelt werden müßte.

Als Empfänger dient ein komplettes Höhrempfangssystem, Spezialtype für Luftschiffe und Aeroplane. Der Empfang geschieht nur mit dem Telefon. Die einzelnen Teile des Empfängers sind: variable Selbstinduktion, Detektor, Telefon nebst Blockierungskondensator und eine Blockierung für den Detektor. Alle diese Teile sind gleichfalls im Apparatschrank untergebracht. Die Reichweite der Station beträgt bis zu 200 km, je nachdem die korrespondierende Station größer oder kleiner ist. Das Gewicht des kompletten Apparateschrankes mit Luftdrahthaspel und Luftdraht beträgt ca. 70 kg, das der Wechselstrommaschine mit Erreger-dynamo ca. 55 kg.

Die Radiostation für Flugzeuge nach dem System Telefunken.

Wie bei den Funkenstationen für Lenkballons sind auch für die Konstruktion dieser Station in erster Linie die engen Raumverhältnisse an Bord der Flugzeuge maßgebend gewesen. Die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie führt 2 Arten

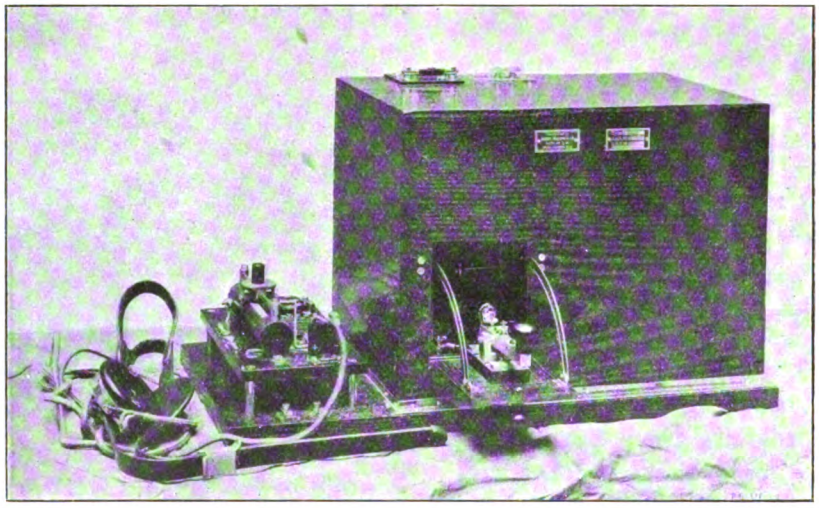


Fig. 3. Flugzeugstation, System „Telefunken", für kleinere Reichweiten.

von Flugzeugstationen aus. Die kleinere mit Batteriebetrieb hat eine Reichweite von ca. 25 km, die größere Type mit einer Dynamo als Stromquelle hat eine solche von ca. 100 km, um bei Beobachtungsflügen Meldungen über feindliche Stellungen auf größere Entfernungen an die leitende Kommandostelle machen zu können.

Das Luftleitergebilde ist ebenfalls auf einer Haspel aufgewickelt, die möglichst leicht gehalten ist und in der Nähe des Telegraphistensitzes an dem Gestell angeschraubt wird. Von der Haspel führt der Antennendraht in einem Kupferrohr längs eines Trägers des Fahrgestelles zu einem Punkte, bei dem einerseits keine

Digitized by Google

Gefahr vorhanden ist, daß der abgewickelte Draht in den Propeller gerät, und der andererseits beim Landen nicht mit dem Erdboden in Berührung kommen kann. Das Ende des Drahtes ist mit einer Bleikugel beschwert, um ein leichtes Abwickeln herbeizuführen und um den Draht in abgewickeltem Zustande stets gespannt zu halten. Der Draht selbst ist in Abständen von 5 zu 5 m mit Reißstellen versehen, deren Zerreißfestigkeit nur 5—10 kg beträgt, um, falls das Flugzeug beim niedrigen Fliegen irgendwo am Erdboden verwickelt wird, sofort zu reißen und auf diese Weise zu verhindern, daß das Flugzeug selbst durch einen plötzlichen Ruck in Kippgefahr gerät.

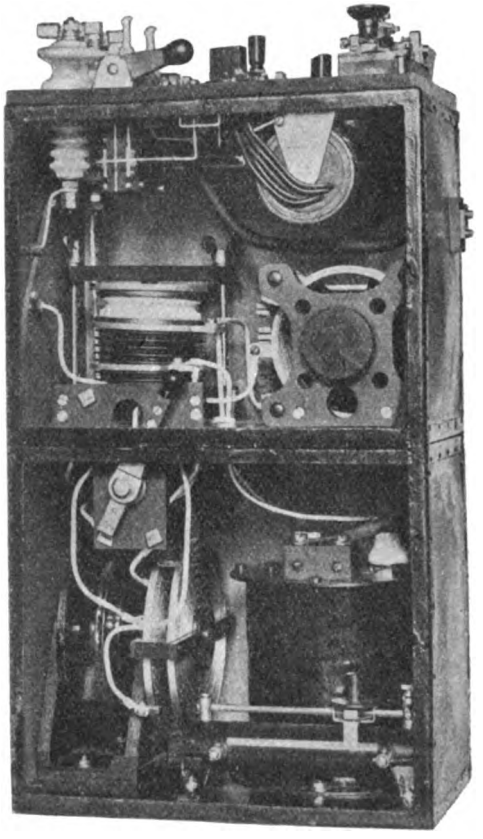


Fig. 4. Aeroplan-Station.

Als Gegengewicht dienen sämtliche Metallteile des Flugzeuges, wie Spanndrähte des Gestelles, der Motor, die Kühler usw. Zur Erzielung größerer Reichweiten wird gegebenenfalls die Kapazität des Gegengewichtes noch durch besonders ausgespannte Drähte bzw. durch Metallverkleidungen der Tragflächen vergrößert. Der Sender der kleineren Station (Fig. 3) ist in einen Holzkasten eingebaut, an dessen Vorderseite herausklappbar die Taste aufmontiert ist. Die Batterie wird unter den Sitzen angebracht. Der Sender besteht aus einem Induktor mit Hammerunterbrecher, dessen hochgespannter Strom die Kapazität des Senders auflädt. Die Regulierung der Koppelung zwischen der Antenne und dem Primärkreis sowie die Veränderung der Selbstinduktion der Antennenverlängerungsspule erfolgt durch 2 auf dem Senderkasten befindliche Handgriffe, die sich einzeln feststellen lassen. Zur Inbetriebsetzung des Senders ist nur erforderlich, die Verbindungsleitung zwischen der Haspel und dem Sender herzustellen. Auf dem Kasten befindet sich außerdem noch eine Heliumröhre als Wellenindikator, die die Resonanz zwischen Primär- und Sekundärkreis durch Aufleuchten anzeigt.

Auf der Grundplatte des Senders ist auch der Empfänger angeordnet. Der Anschluß des Empfängers an die Antenne geschieht dadurch, daß die Stöpselschnur der Luftdrahthaspel von dem Sender gelöst und in das Stöpselloch des Empfängers eingesteckt wird. Auf der Empfängerplatte befindet sich eine Schiebespule zur Veränderung der Abstimmung der Antenne. Parallel zu dieser ist der Detektor und das Telephon mit einem Blockierungskondensator geschaltet. Das Gewicht der kompletten Station beträgt ca. 25 kg.

Digitized by Google

Bei der größeren Station mit 100 km Reichweite sind sämtliche Einzelapparate des Senders und Empfängers in einem verschließbaren Kasten angebracht. Der Sender ist nach dem neuen Funkensystem der „Tönenden Löschfunken" gebaut (Fig. 4) und für das wahlweise Senden von 3 verschiedenen Wellenlängen eingerichtet. Die zum Betrieb des Senders erforderliche Energie wird von einer 500periodigen Wechselstrommaschine geliefert, die von dem Flugzeugmotor mittels einer biegsamen Welle angetrieben wird. Im Betrieb ist gleichzeitig eine Kuppelung vorgesehen, vermittels welcher die Dynamomaschine nach Belieben ein- und ausgeschaltet werden kann. Die Kuppelung wird mittels Seilzuges vom Sitze des Telegraphisten aus bedient. Das Gewicht der kompletten Station beträgt zirka 40—50 kg.

Fig. 5. Fliegerkappe mit eingebautem Telephon.

Um das Geräusch des Flugzeugmotors beim Empfang möglichst unschädlich zu machen, ist das Telephon in die Fliegerkappe des Telegraphisten schalldicht eingebaut (Fig. 5).

Der Telefunken-Kompaß.

Ein schwieriges, aber äußerst wichtiges Problem besteht für Lenk- und Freiballons und Flugzeuge darin, ihre augenblickliche Stellung oder ihren Kurs bei unsichtigem Wetter festzustellen. Die drahtlose Technik erschien seit langer Zeit als ein geeignetes Mittel, und es wurden zahlreiche Methoden angegeben, welche für diesen Zweck eine neue Signalmethode nutzbar machen sollten. Man fand eine Reihe von Methoden, die sich auf das Aussenden gerichteter Wellenzüge stützen. Auf zwei Wegen suchte man gute Resultate zu erzielen, einmal dadurch, daß man von der Senderstation keine gerichteten Wellenzüge entsandte, aber den Empfänger so einrichtete, daß er die Richtung der Senderstation erkennen ließ, oder daß man den Sender so konstruierte, daß er gerichtete Wellenzüge ausstrahlt, die den Empfänger nur in der betreffenden Richtung ansprechen lassen. Auf die letztere Basis ist der Telefunkenkompaß eingerichtet. Der Sender besteht hierbei aus einer Hauptantenne (Fig. 6), um die im Kreise herum 32 kleinere Masten aufgestellt sind, zu denen einzelne Antennen isoliert voneinander gespannt sind. Ein automatischer Drehschalter schließt in regelmäßigen Zeitabständen je zwei gegenüberliegende Antennen an den Sender, wodurch in deren Richtung ein Wellenzug ausgesandt wird. An dem Hauptmast in der Mitte ist eine ungerichtete Antenne angebracht, die zu Beginn einer vollen Umdrehung, d. h. bei der Nord-Süd-Richtung der Wellenzüge ein kurzes Signal gibt, das als Stations- oder als Zeitsignal be-

Digitized by Google

zeichnet wird. Alsdann erfolgt die automatische Einschaltung der gerichteten Antennenpaare, die, wie erwähnt, in zeitlich regelmäßigen Abständen ein kurzes Zeichen ausstrahlen. Die Drehung des Drehschalters erfolgt im Sinne des Uhrzeigers. Der normale Empfänger der sich orientierenden Station erhält einen Zusatzapparat in Gestalt einer mit der Drehgeschwindigkeit des Senders synchronen Anzeigevorrichtung. Diese ist als „Stoppuhr" ausgeführt, welche nicht in Grade eingeteilt ist, sondern in Himmelsrichtungen wie eine Windrose. Der Anfangspunkt der Stoppuhr ist mit derjenigen Himmelsrichtung bezeichnet, mit welcher

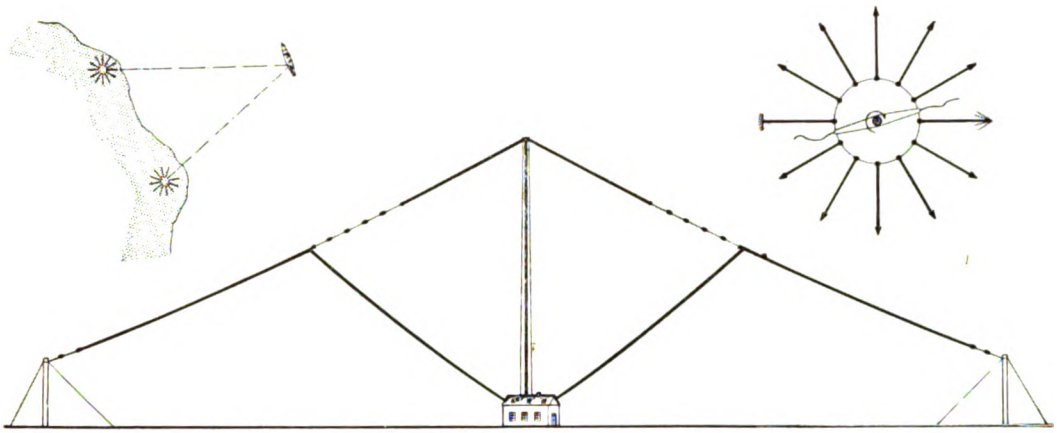


Fig. 6. Antennen-Anordnung des Telefunken-Kompaß.

der gerichtete Sender seine Drehbewegung anfängt, in diesem Falle mit der Nord-Süd-Richtung. Der Telegraphist der Empfangsstation hört das Stations- und Zeitsignal des Senders und drückt auf die Stoppuhr, so daß der Zeiger seine Bewegung anfängt. In diesem Moment gehen vom Sender gerichtete Signale in der Nord-Süd-Richtung aus. Hört der Telegraphist das Minimum der Lautstärke, so arretiert er die Stoppuhr, der Zeiger steht dann in derjenigen Richtung, in welcher der Sender das mit minimaler Lautstärke angekommene Signal abgab. Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Senders bzw. der Stoppuhr beträgt eine halbe Minute, so daß beispielsweise in 5 Minuten 10 vollkommene Drehungen und damit 10 Messungen der Lautstärke ausgeführt werden können. Der Mittelwert hat dann eine erheblich größere Genauigkeit als bei einer einzigen Messung.

Ist nur ein fester Sender vorhanden, so läßt sich nur die Richtung des beweglichen Empfängers zu diesem feststellen; sind zwei feste Stationen vorhanden, so werden vom Empfänger zwei Richtungsbestimmungen ausgeführt, die auf der Karte eingetragen werden, wodurch der Ort des Empfängers als Schnittpunkt der beiden Richtungen gefunden wird. Die Genauigkeit wird umso größer sein, je kleiner die Entfernung des Empfängers von den festen Stationen ist und je mehr sich der beobachtete Richtungswinkel 90^0 nähert.

Nach den bisherigen Ergebnissen ist es möglich, den Winkel bis auf 3 oder 4^0 genau zu bestimmen.

Die praktische Ausführung dieser Methode für die deutsche Luftschiffahrt würde sich etwa folgender Weise gestalten:

Digitized by Google

Man würde z. B. an der politischen Grenze Deutschlands eine Kette von festen Stationen mit je 50—100 km Abstand errichten, so daß die größte Entfernung für die Station an Bord der Luftschiffe von diesen Stationen beim Überfliegen der Kette höchstens 50 km betragen würde. Hierdurch würden die Insassen der Luftfahrzeuge nicht allein die Tatsache der Grenzüberschreitung in ihrem Empfangsapparat beobachten, sondern auch eine genaue Feststellung ihrer augenblicklichen Position sehr leicht bewerkstelligen können. Auf der Karte (Tafel I) ist die eben genannte Stationskette eingetragen. Die Kreise bedeuten den Aktionsradius der einzelnen Stationen. Man benötigt hiernach für die Westgrenze etwa 8, für die Nordseeküste 3, für die Ostseeküste 8 Stationen. Der Bedarf an elektrischer Energie für jede dieser Richtstationen würde weniger als ½ KW. betragen. Die Stationen würden in der Nähe größerer Städte installiert werden, wo die Energie aus vorhandenen Elektrizitätswerken entnommen würde. Zum Tragen der Antennen würden sich in den meisten Fällen vorhandene Schornsteine oder dgl. benutzen lassen. Personal für die Wartung der Stationen wäre unnötig, da diese automatisch arbeiten.

Verwendung des Telefunken-Systems in der Luftschiffahrt.

Die Deutsche Luftschiffahrt-Aktien-Gesellschaft (Delag) hat ihre Zeppelin-Luftschiffe Hansa und Viktoria Luise mit den modernen Funkspruchseinrichtungen der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie ausrüsten lassen. Zum ersten Mal ist dieser drahtlose Telegrammverkehr auf Luftschiffen während des vorjährigen Oberrheinischen Überlandfluges in Betrieb genommen worden. Die Stationen haben in erster Linie die Bestimmung, dem Luftschiffer auf seinen weiten Fahrten die Beobachtung der Wetterwarten zu übermitteln und das Luftschiff über die Zustände der Atmosphäre zu unterrichten. Ferner sollen sie den Luftschiffen selbst die Möglichkeit geben, das Landungspersonal in den Luftschiffhäfen von einer beabsichtigten Landung rechtzeitig zu benachrichtigen. Außerdem stehen die telegraphischen Anlagen der Luftschiffe auch den Passagieren für ihre persönlichen Telegramme zur Verfügung. Nach dem Bericht eines Fahrtteilnehmers hat das Luftschiff „Viktoria Luise“ während des Oberrheinischen Überlandfluges mit der Radiostation Frankfurt a. M. (Fig. 7) auf ca. 200 km in Verbindung gestanden, mit anderen Landstationen wurden sogar Entfernungen über 300 km erzielt. Sämtliche von Luftschiffen mit Genehmigung der Reichspost an Private aufgegebenen Telegramme sind den Adressaten zugestellt worden. Fig. 8 stellt die Außenansicht der Funkenspruchstation an Bord eines Zeppelinluftschiffes dar, während Fig. 9 die Inneneinrichtung der genannten Station zeigt. Als Landstationen dienen nicht nur die offiziellen Funkspruchstationen der Reichspost, sondern auch eigene Anlagen, mit denen bereits einige Luftschiffahrtsgesellschaften ihre Luftschiffhäfen ausgerüstet haben.

Betriebsbereit sind zurzeit die Stationen der Deutschen Luftschiffahrt-Aktien-Gesellschaft in Frankfurt a. M. und die Station in Mannheim, dem Hafen des Schütte-Lanz-Luftschiffes (Fig. 10).

Digitized by Google

Fig. 7. Telefunkenstation Frankfurt a. M.

Digitized by Google

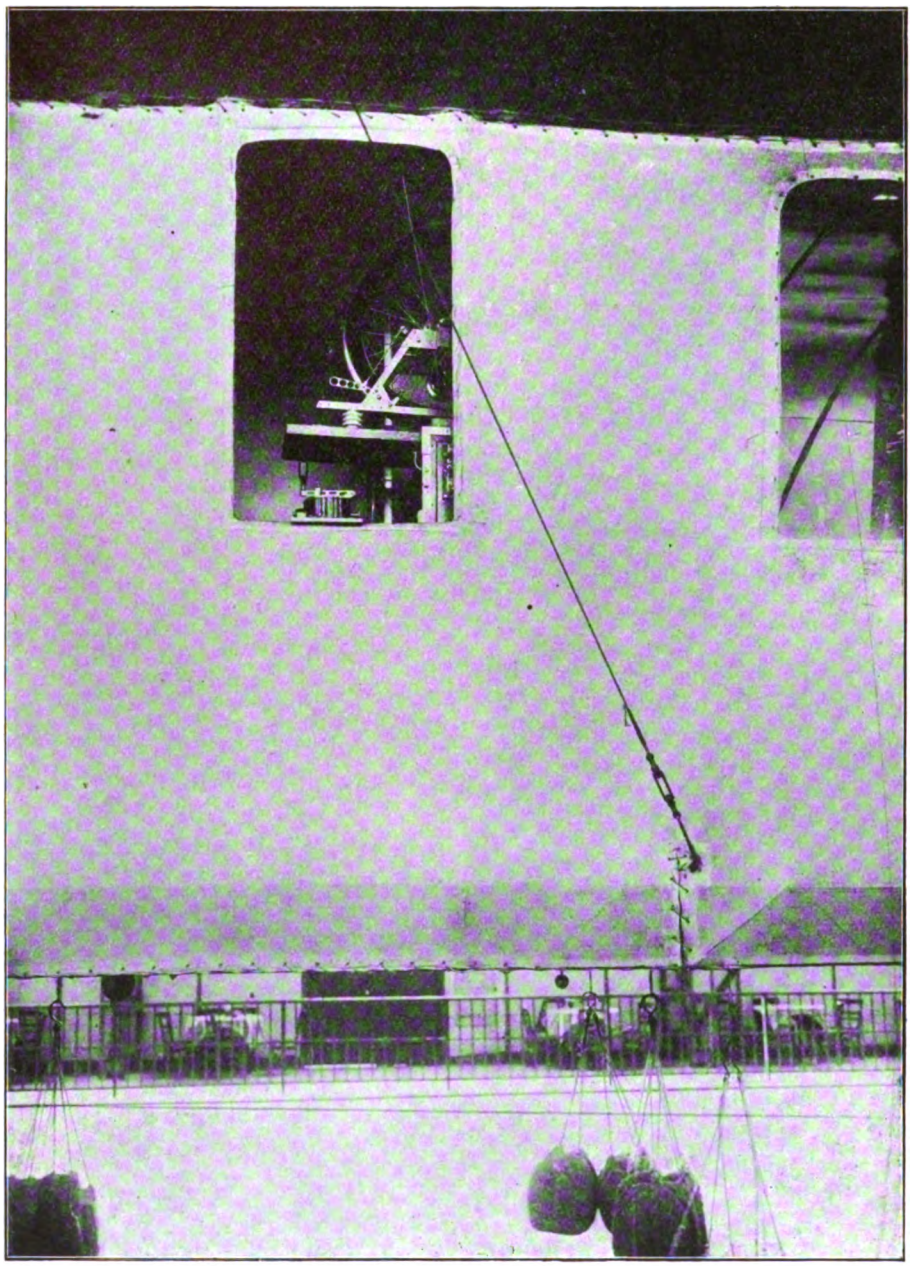


Fig. 8. Außenansicht der Telefunken-Station an Bord eines Zeppelin-Luftschiffes.

Digitized by Google

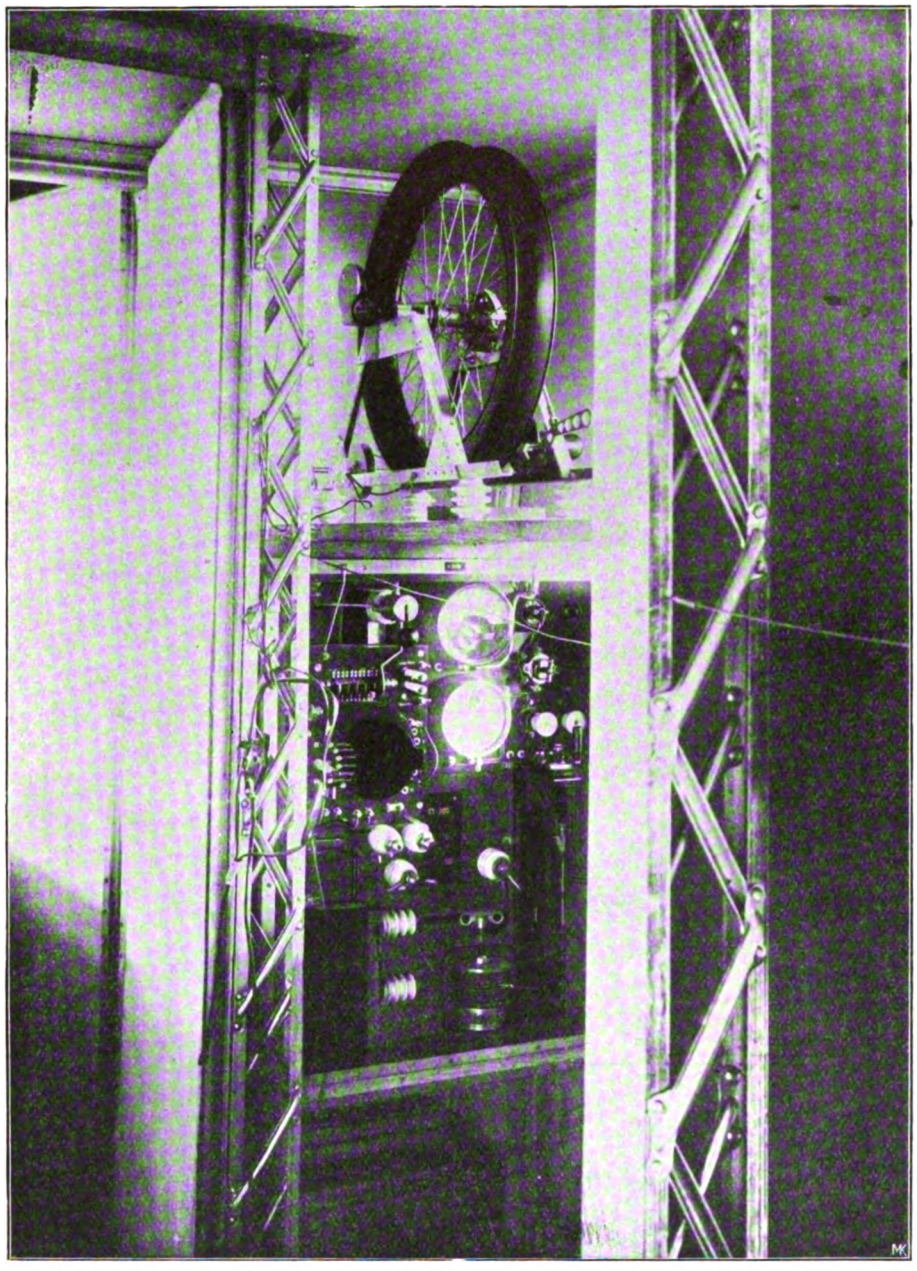


Fig. 9. Inneres einer Telefunken-Station an Bord eines Zeppelin-Luftschiffes.

Digitized by Google

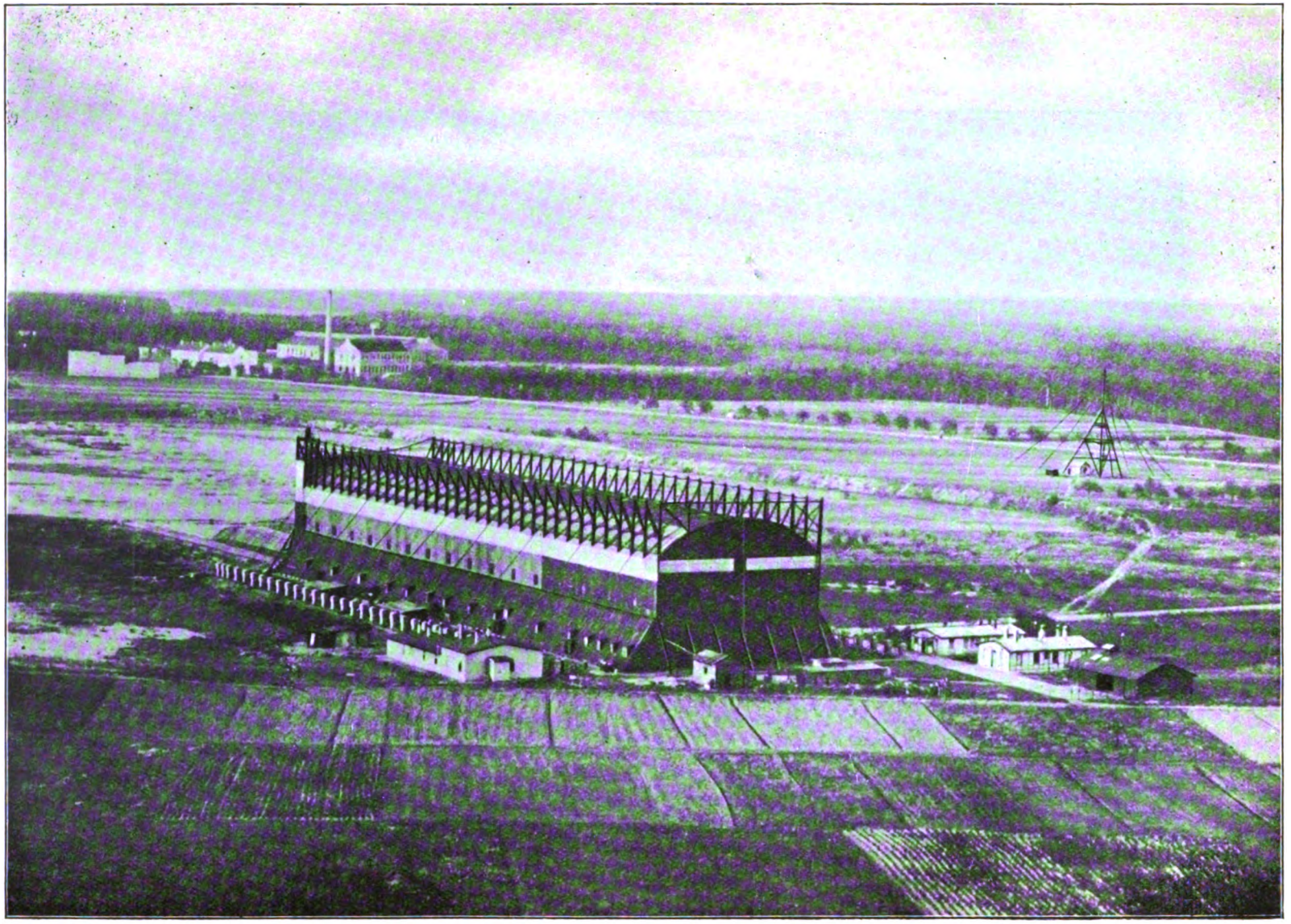


Fig. 10. Telefunken-Station des Schütte-Lanz-Luftschiffhafens in Mannheim.

Digitized by Google

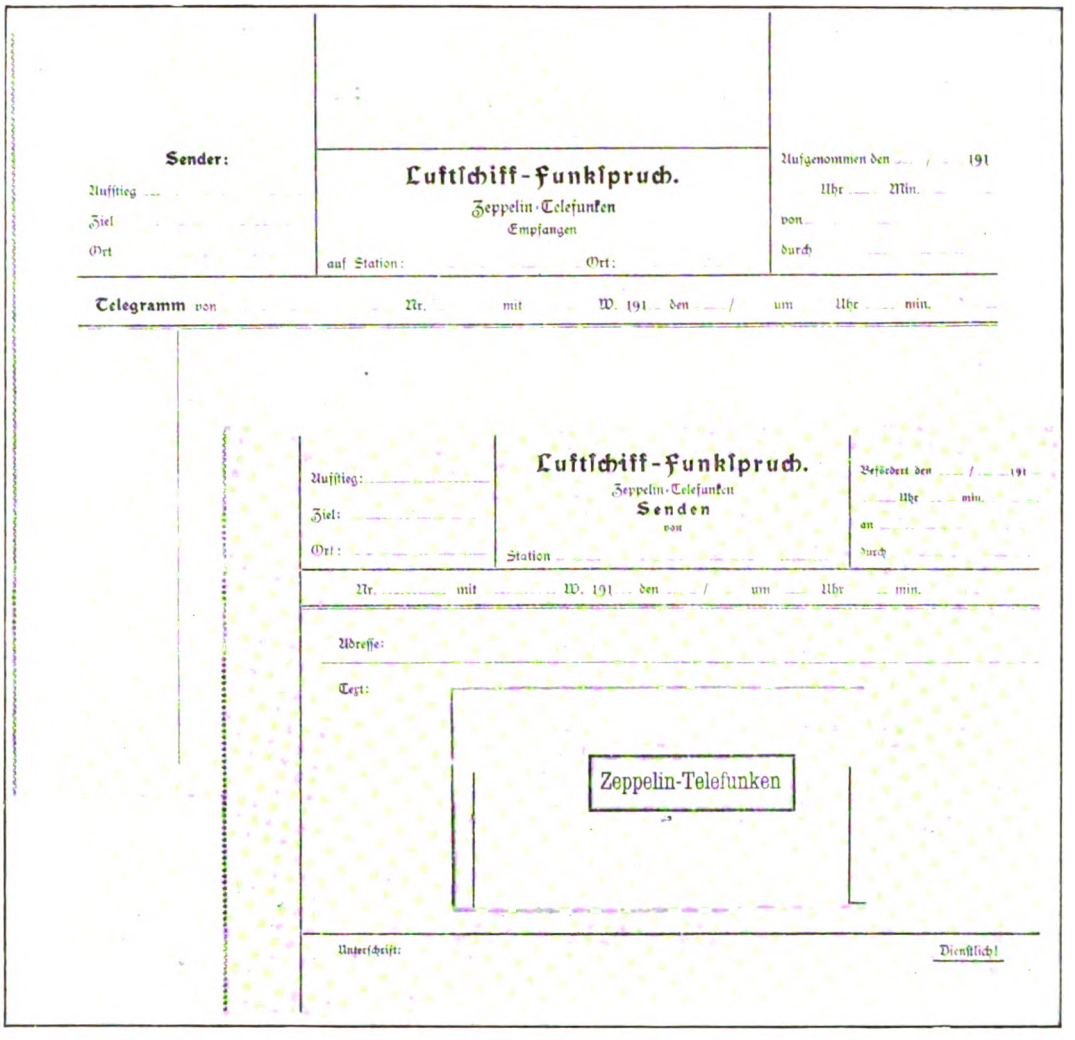


Fig. 11. Lufttelegramm-Formulare.

Für diesen neuartigen Luft-Telegrammverkehr sind besondere Telegrammformulare hergestellt worden, die auf den Lufttelegraphenämtern ausliegen bzw. von dort den Adressaten zugestellt werden. In Faksimile zeigt Fig. 11 ein Formular in offenem und versiegeltem Zustande.

Digitized by Google

Digitized by Google

Über die Spannungsverteilung auf den Hüllen von Prall-Luftschiffen.

Von
Dr.-Ing. **Karl Heyer**-Bad Dürckheim.

Digitized by Google

Digitized by Google

Einleitung.

Die folgende Arbeit bietet einige Beispiele zur Theorie über das Gleichgewicht von Flächen, die gegebenen äußern Kräften unterworfen sind; entsprechend dem Zwecke der Abhandlung, eine Aussage über die Spannungen zu geben, die in Ballonhüllen auftreten, beziehen sich die behandelten Fälle nur auf Rotationsflächen; dabei werden als äußere Kräfte jene angenommen, die tatsächlich auf Ballonhüllen einwirken.

Die Arbeit entstand auf Anregung meines hochverehrten Lehrers, Herrn Geh. Hofrat Prof. Dr. S. Finsterwalder, dem ich dafür und für seinen wohlwollenden Rat bei der Ausarbeitung meinen besten Dank ausspreche.

Von den Arbeiten, die über die Theorie des Gleichgewichts biegsamer und unausdehnbarer Flächen vorliegen, diente dieser Abhandlung die Arbeit Lecornus: Sur l'Equilibre des surfaces flexibles et inextensibles (Journal de l'Ecole Polytechnique, Cah. 48, Tome 29, 1880) als hauptsächliche Grundlage. Soweit sie in Betracht kommen, seien ihre Resultate kurz wiedergegeben, wobei für die in der Flächentheorie auftretenden Größen nicht die Lecornu'schen Zeichen, sondern die in Scheffers Theorie der Flächen gebrauchten Bezeichnungen verwendet werden.

Ist eine Fläche unter Einwirkung von Kräften im Gleichgewicht, so bildet sich auf ihr ein Spannungszustand aus, indem auf jedes Linienelement der Fläche eine nach Größe und Richtung bestimmte Spannung wirkt; d. h. würde die Fläche nach einem Linienelement aufgeschnitten, so wäre zur Erhaltung des Gleichgewichtes an den beiden Rändern des Schnittes je eine gewisse Kraft anzubringen, die für den einen Rand dieselbe Größe und die entgegengesetzte Richtung wie die am anderen Rand anzubringende Kraft hat. Diese auf die Längeneinheit reduzierte Kraft heißt Spannung, ihre Komponenten parallel und normal zum Linienelement Tangential- bzw. Normalspannung. Die Spannung variiert nicht nur von Punkt zu Punkt, sondern besitzt auch für die verschiedenen Linienelemente eines Punktes verschiedene Werte. Es sei nun auf der Fläche ein orthogonales System

---

Denselben Gegenstand behandeln:

Lecornu: Sur l'Equilibre d'une Enveloppe ellipsoidale (Annales de l'Ecole Normale Supérieure, S. III, Tome 17).

Beltrami: Equilibrio delle Superficie flessibile et inestendibile (Memoria della Accdemia di Bologna, IV. B., 1881).

Volterra: Sull' Equilibrio delle Superficie ect. (Roma Accademia dei Lincei Atti, Serie III, Vol. 8, 1883—1884.

Morera: Sull' Equilibrio delle Superficie ect. (R. Accademia dei Lincei, III, 7, 1882—1883).

E. Daniele: Sull' Equilibrio delle Reti (Rendiconti dell' Circolo Matematico di Palermo, Tome XIII, 1899).

Digitized by Google

von Parameterlinien u, v gegeben; im Punkte u, v seien n_1 und t_1 Normal- und Tangentialspannung der U-Linie (v = const), n_2 und t_2 dasselbe für die V-Linie (u = const) (Fig. 1). Über den Sinn dieser Spannungen gibt Fig. 2 Aufschluß: n_1 und n_2 sind positiv, wenn sie in das Innere des von den Punkten u, v; u + du, v; u, v + dv; u + du, v + dv; gebildeten Rechteckes gerichtet sind; demnach sind n_1 und n_2 Druckspannungen, wenn sie positives Zeichen haben; negative Spannungen wirken als Zugspannungen. t_1 und t_2 sind positiv, wenn sie im Punkte u, v entgegengesetzt dem wachsenden u bzw. v gerichtet sind.

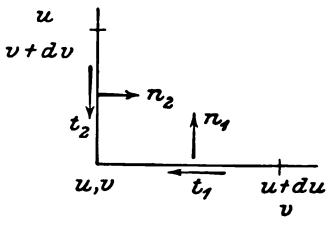


Fig. 1.

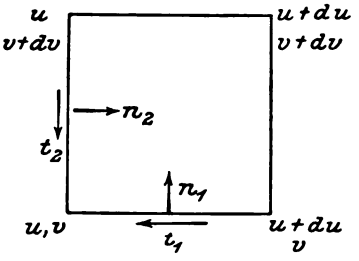


Fig. 2.

Die Gleichgewichtsbedingungen, angewandt für ein unendlich kleines Dreieck, ergeben $t_1 = t_2 = t$ und die Komponenten der Spannung, welche ein unter dem Winkel α gegen die U-Linie geneigtes Element erleidet, zu

1) $$\begin{aligned} \text{Normalkomp. } N &= n_1 \cos^2\alpha + n_2 \sin^2\alpha + 2\,t \sin\alpha \cos\alpha \\ \text{Tangentialkomp. } T &= t\,(\cos^2\alpha - \sin^2\alpha) - (n_1 - n_2) \sin\alpha \cos\alpha. \end{aligned}$$

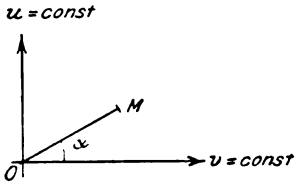


Fig. 3.

Sind an einem Punkt also die drei Größen n_1, n_2 und t bekannt, so kann für jedes durch diesen Punkt gehende Linienelement die Spannung aus den Gleichungen 1 berechnet werden. Zu einer einfachen geometrischen Deutung des Spannungszustandes in einem Flächenpunkte gelangt man auf folgende Weise: Trägt man vom Punkte u, v (siehe Fig. 3) in der Richtung des Linienelementes, d. h. in Richtung α die Strecke $OM = \frac{1}{\sqrt{N}}$ ab, so hat M in bezug auf das von U- und V-Linie gebildete System die Koordinaten $x = \frac{\cos\alpha}{\sqrt{N}}$, $y = \frac{\sin\alpha}{\sqrt{N}}$. Aus Gleichung 1) folgt dann, daß M bei Veränderung von α den Kegelschnitt: $n_1 x^2 + 2\,t\,x\,y + n_2 y^2 = 1$ beschreibt. Das Quadrat des Radiusvektors ist $x^2 + y^2 = \frac{1}{N}$ und stellt also den reziproken Wert der normalen Spannung dar, welche ein in Richtung des Radiusvektors orientiertes Element erleidet. Außerdem läßt sich zeigen, daß die totale auf O M wirkende Spannung in der zu O M bezüglich des Kegelschnitts konjugierten Richtung wirkt. Daraus folgt, daß die in Richtung der Hauptachsen dieses „Spannungskegelschnittes" liegenden Linienelemente nur normaler Spannung unterliegen, während durch die Asymptoten jene Elemente bestimmt werden, die nur

Digitized by Google

tangential beansprucht sind $\left(\text{denn für diese ist } \frac{1}{\sqrt{N}} = \infty, \text{ also } N = 0\right)$. Die Zusammensetzung dieser Linienelemente führt zu ähnlichen Kurvensystemen, wie sie bei der Frage nach der Krümmung von Flächen auftreten: zu Hauptspannungslinien analog den Krümmungslinien, zu Scherungslinien entsprechend den Asymptotenlinien und zu Systemen bezüglich der Spannung konjugierter Kurven. Dabei heißen zwei Linienelemente konjugiert bezüglich der Spannung, wenn ihre Richtungen konjugiert in bezug auf den Spannungskegelschnitt sind; dann besitzt also die totale Spannung des einen Linienelementes die Richtung des konjugierten Linienelementes und umgekehrt. Die Achsenrichtungen des Spannungskegelschnittes sind gegeben durch $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2t}{n_1 - n_2}$; dies führt, wenn $E\,du^2 + G\,dv^2$ das Bogenelement der Fläche ist, zur Differentialgleichung der Hauptspannungslinien:

$$G\,t\,dv^2 + \sqrt{E\,G}\,(n_1 - n_2)\,du\,dv - E\,t\,du^2 = 0.$$

Die Gleichung der Scherungslinien ergibt sich durch Nullsetzen der quadratischen Glieder des Kegelschnitts zu:

$$n_1\,E\,du^2 + 2\,t\sqrt{E\,G}\,du\,dv + n_2\,G\,dv^2 = 0.$$

Zwei konjugierte Kurvensysteme sind durch:

$$n_1\,E\,du_1\,du_2 + t\sqrt{E\,G}\,(du_1\,dv_2 + du_2\,dv_1) + n_2\,G\,dv_1\,dv_2 = 0$$

verbunden.

Die auf die Flächeneinheit bezogenen äußeren Kräfte zerlegen sich in die Komponenten F_1, F_2, Φ in Richtung der Linien $v = \text{const}$ und $u = \text{const}$ und der Flächennormalen. Der Richtungssinn ist dadurch festgelegt, daß der Sinn der wachsenden u und v auch der positive Sinn von F_1 bzw. F_2 ist; Normalkomponente Φ ist positiv, wenn sie dieselbe Richtung wie die positive Flächennormale hat.

Der Spannungszustand in einem Flächenpunkt ist bekannt, wenn man dort die Werte von n_1, n_2, t kennt; diese Werte ändern sich von Punkt zu Punkt, n_1 n_2 t sind Funktionen von u und v. Für sie fand Lecornu durch Anwendung des Prinzips der virtuellen Verschiebungen folgende Grundgleichungen:

2)
$$\begin{aligned}
\frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial n_2}{\partial u} - \frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial t}{\partial v} + \frac{n_1 - n_2}{\rho_2} + \frac{2t}{\rho_1} &= F_1\\
\frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial n_1}{\partial v} - \frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial t}{\partial u} + \frac{n_2 - n_1}{\rho_1} + \frac{2t}{\rho_2} &= F_2\\
\frac{n_1}{R_2} + \frac{n_2}{R_1} - \frac{2t}{T} &= \Phi,
\end{aligned}$$

$$\frac{1}{R_1} = \frac{L}{E}, \quad \frac{1}{R_2} = \frac{N}{G}$$

sind die normalen,

$$\frac{1}{\rho_1} = -\frac{1}{\sqrt{E\,G}}\frac{\partial\sqrt{E}}{\partial v} \text{ und } \frac{1}{\rho_2} = -\frac{1}{\sqrt{E\,G}}\frac{\partial\sqrt{G}}{\partial u}$$

Digitized by Google

die geodätischen Krümmungen der Parameterkurven, $\frac{1}{T} = \frac{M}{\sqrt{EG}}$ die für beide gleiche geodätische Torsion, d. h. die Torsion einer die Parameterkurve im betrachteten Punkt berührenden geodätischen Linie.

In den der zweiten Glieder (F_1, F_2, Φ) beraubten Gleichungen 2 erkennen wir die Gleichungen für die infinitesimale, isometrische Transformation einer Fläche, wenn wir uns unter $n_1\,\varepsilon$, $n_2\varepsilon$, $t\,\varepsilon$ (ε sehr klein) die Variationen der Größen $\frac{1}{R_1}$, $\frac{1}{R_2}$, $\frac{1}{T}$ vorstellen. Ersetzt man also

$$n_1 \text{ durch } \frac{\delta\frac{1}{R_1}}{\varepsilon} = \frac{\delta\frac{L}{E}}{\varepsilon} = \frac{\delta L}{E\cdot\varepsilon} = \frac{d}{E}$$

$$n_2 \quad ,, \quad \frac{\delta\frac{1}{R_2}}{\varepsilon} = \frac{\delta\frac{N}{G}}{\varepsilon} = \frac{\delta N}{G\cdot\varepsilon} = \frac{d''}{G}$$

$$t \quad ,, \quad \frac{\delta\frac{1}{T}}{\varepsilon} = \frac{\delta\frac{M}{\sqrt{EG}}}{\varepsilon} = \frac{\delta M}{\sqrt{EG}\,\varepsilon} = \frac{d'}{\sqrt{EG}}$$

so erhält man aus den Gleichungen 2 die Gleichungen für die unendlich kleinen Verbiegungen einer Fläche, wie sie z. B. bei Bianchi: Vorlesungen über Differentialgeometrie, § 163, aufgestellt sind.

Die Grundgleichungen 2) behandelt Lecornu weiter; er setzt an:

$$n_1 = n_1' + \frac{a}{R_1};\quad n_2 = n_2' + \frac{a}{R_2};\quad t = t' + \frac{a}{T}.$$

Die linken Seiten von 2) schreiben sich durch diese Substitution unverändert in den gestrichenen Unbekannten; die rechten Seiten werden jedoch:

$$F_1 - \frac{1}{\sqrt{E}\,R_2}\frac{\partial a}{\partial u} + \frac{1}{\sqrt{G}\,T}\frac{\partial a}{\partial v} = F_1'$$

$$F_2 - \frac{1}{\sqrt{G}\,R_1}\frac{\partial a}{\partial v} + \frac{1}{\sqrt{E}\,T}\frac{\partial a}{\partial u} = F_2'$$

$$\Phi - 2a\left(\frac{1}{R_1 R_2} - \frac{1}{T^2}\right) = \Phi'.$$

Es wird nun

$$a = \frac{\Phi}{2}\,\frac{1}{\frac{1}{R_1 R_2} - \frac{1}{T^2}}$$

gewählt und die äußeren Kräfte $F_1\,F_2\,\Phi$ in die zwei Systeme zerlegt:

1. System: Normalkraft Φ und die Tangentialkräfte:

$$\frac{1}{\sqrt{E}\,R_2}\frac{\partial a}{\partial u} - \frac{1}{\sqrt{G}\,T}\frac{\partial a}{\partial v},\quad \frac{1}{\sqrt{G}\,R_1}\frac{\partial a}{\partial v} - \frac{1}{\sqrt{E}\,T}\frac{\partial a}{\partial u}.$$

Digitized by Google

2. System: Die tangentialen Kräfte $F_1' F_2'$ ohne Normalkräfte.

Für das erste System — das Normalsystem — verschwinden nach der angegebenen Substitution die rechten Seiten der Grundgleichungen; diese lassen daher die partikuläre Lösung $n_1' = n_2' = t' = 0$ zu. Die Gleichungen des 2. Systems — des Tangentialsystems — werden:

$$3)\quad \begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial n_2'}{\partial u} - \frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial t'}{\partial v} + \frac{n_1' - n_2'}{\rho_2} + \frac{2t'}{\rho_1} &= F_1' \\ \frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial n_1'}{\partial v} - \frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial t'}{\partial u} + \frac{n_2' - n_1'}{\rho_1} + \frac{2t'}{\rho_2} &= F_2' \\ \frac{n_1'}{R_2} + \frac{n_2'}{R_1} - \frac{2t'}{T} &= 0. \end{aligned}$$

Ist es gelungen, eine partikuläre Lösung $\bar{n}_1' \bar{n}_2' \bar{t}'$ dieses Systems zu finden, so reduzieren sich die Gleichungen 3) auf die der unendlich kleinen Verbiegung. Deren allgemeine Lösung ist dann den partikulären Integralen $\bar{n}_1' \bar{n}_2' \bar{t}'$ hinzuzufügen, um die allgemeine Lösung $n_1' n_2' t'$ von 3 zu erhalten. In $n_1' + \frac{a}{R_1}, n_2' + \frac{a}{R_2}$, $t' + \frac{a}{T}$ hat man dann auch die Lösungen der Grundgleichungen 2).

Für Rotationsflächen gestalten sich die Gleichungen des Tangentialsystems etwas einfacher. Ist $x = p(u)$, $z = q(u)$ die Gleichung des Meridians als Funktion der Bogenlänge u, dann heißt die Flächengleichung:

$$\begin{aligned} x &= p(u) \cos v \\ y &= p(u) \sin v \\ z &= q(u) \end{aligned}$$

wenn die Z-Achse zur Rotationsachse gewählt wird. Zwischen p und q besteht die Beziehung

$$p'^2 + q'^2 = 1$$

und die durch Differentiation daraus abgeleitete:

$$p' p'' + q' q'' = 0.$$

Die Fundamentalgrößen der Rotationsfläche sind dann:

$$E = 1;\quad F = 0;\quad G = p^2;\quad L = -\frac{p''}{q'};\quad M = 0;\quad N = p q';$$

ferner ist der Krümmungsradius des Meridians $R_1 = -\frac{q'}{p''}$, die Normale oder der 2. Hauptkrümmungsradius $R_2 = \frac{p}{q'}$, geodätische Torsion $\frac{1}{T} = 0$; geodätische Krümmung des Meridians $\frac{1}{\rho_1} = 0$ und die des Parallelkreises $\frac{1}{\rho_2} = -\frac{p'}{q}$.

Nach Einführung dieser Größen werden die Gleichungen des Tangentialsystems:

Digitized by Google

$$\frac{\partial n_2'}{\partial u} - \frac{1}{p}\frac{\partial t'}{\partial v} + (n_1' - n_2')\left(-\frac{p'}{p}\right) = F_1'$$

4) $$\frac{1}{p}\frac{\partial n_1'}{\partial v} - \frac{\partial t'}{\partial u} + 2t'\left(-\frac{p'}{p}\right) = F_2'$$

$$n_1'\frac{q'}{p} - n_2'\frac{p''}{q'} = 0.$$

Wird in die beiden ersten Gleichungen das sich aus der dritten ergebende $n_1' = \frac{p\,p''}{q'^2} n_2'$ eingesetzt, neue Unbekannte

$$N = n_2' p\, q'$$
$$T = -p^2 t'$$

eingeführt, dann erhalten wir schließlich die Gleichungen:

5) $$\frac{\partial N}{\partial u} + \frac{q'}{p^2}\frac{\partial T}{\partial v} = F_1' p\, q'$$
$$\frac{\partial T}{\partial u} + \frac{p\,p''}{q'^3}\frac{\partial N}{\partial v} = F_2' p^2.$$

Hierin ist

$$F_1' = F_1 - \frac{q'}{p}\frac{\partial a}{\partial u}$$

6) $$F_2' = F_2 + \frac{p''}{p\,q'}\frac{\partial a}{\partial v}$$

$$a = \frac{\Phi}{2} R_1 R_2 = -\frac{\Phi}{2}\frac{p}{p''}.$$

Um die auf einer Rotationsfläche von den Kräften F_1, F_2, Φ hervorgerufenen Spannungen zu finden, hat man also folgenden Weg zu beschreiten: Man bilde vermittels der Gleichungen 6 die Tangentialkräfte F_1', F_2', suche die allgemeinen Lösungen N und T von 5, indem man einem aufzufindenden partikulären Integral die allgemeinen Lösungen der Gleichung der unendlich kleinen Verbiegungen hinzufügt; dann findet man $n_2' = \frac{N}{p\,q'}$, $t' = \frac{T}{p^2}$ und schließlich die Spannungen:

$$n_2 = n_2' + \frac{a}{R_2} = n_2' + \frac{\Phi}{2} R_1 = n_2' - \frac{\Phi}{2}\frac{q'}{q''}$$

7) $$n_1 = n_1' + \frac{a}{R_1} = n_1' + \frac{\Phi}{2} R_2 = n_1 + \frac{\Phi}{2}\frac{p}{q'}$$

$$t = t'.$$

Im folgenden werden für einige Fälle Lösungen der Gleichungen 5 gegeben. Das Koordinatensystem der X Y Z ist immer ein Rechtssystem, ebenso das von Meridian-Parallelkreistangente und Flächennormale gebildete. Da der positive Sinn der Parallelkreis- und Meridiantangente der der wachsenden v bzw. u ist, kann die positive Flächennormale jedesmal leicht festgestellt werden. Die Spannung n_1, welche senkrecht zum Meridian wirkt, sei als Ringspannung, n_2 senkrecht zum Parallelkreis wirkend als Meridianspannung bezeichnet. Da sie öfters Ver-

Digitized by Google

wendung finden werden, sind nachfolgend die Richtungskosinusse der Parameterlinien und der Flächennormale aufgeführt:

	X	Y	Z
Meridiantangente:	$\alpha_1 = p' \cos v$	$\beta_1 = p' \sin v$	$\gamma_1 = q'$
Parallelkreistangente:	$\alpha_2 = -\sin v$	$\beta_2 = \cos v$	$\gamma_2 = 0$
Flächennormale:	$\alpha_3 = -q' \cos v$	$\beta_3 = -q' \sin v$	$\gamma_3 = p'$

§ 1.

Spannungsverteilung auf Rotationsflächen, welche einem konstanten Normaldruck Φ unterliegen.

Nach der in der Einleitung entwickelten Methode bilden wir aus dem Kräftesystem $F_1 = 0$, $F_2 = 0$, Φ die Kräfte F_1', F_2' des Tangentialsystems. Es ist nach Gleichung 6):

$$a = -\frac{\Phi}{2}\frac{p}{p''} \text{ nur Funktion von } u,$$

$$F_1' = F_1 - \frac{q'}{p}\frac{\partial a}{\partial u} = \frac{\Phi}{2}\frac{q'}{p}\frac{d}{du}\left(\frac{p}{p''}\right)$$

$$F_2' = F_2 + \frac{p''}{p\,q'}\frac{\partial a}{\partial v} = 0.$$

Also werden die Gleichungen 5):

$$\frac{\partial N}{\partial u} + \frac{q'}{p_2}\frac{\partial T}{\partial v} = \frac{\Phi}{2} q'^2 \frac{d}{du}\left(\frac{p}{p''}\right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial u} + \frac{p\,p''}{q'^3}\frac{\partial N}{\partial v} = 0.$$

Da die Belastung rotatorischen Charakter hat, wird auch die Spannung für jeden Meridian dieselbe sein, also nur von u abhängen; daraus folgt:

$$\frac{\partial N}{\partial v} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial v} = 0.$$

Dann ergibt die 2. Spannungsgleichung auch $\frac{\partial T}{\partial u} = 0$, also $T = \text{const}$. Diese Konstante muß aber notwendig Null sein; denn brächten wir an einem Parallelkreis, nach welchem wir uns die Fläche aufgeschnitten denken, eine konstante Schubspannung an, so hätte diese ein Drehmoment um die Rotationsachse zufolge, das weder durch den Normaldruck Φ noch durch die Spannung $n_2 = f(u)$ kompensiert werden könnte.

Außer $t = 0$ erhalten wir aus der ersten Gleichung:

$$\frac{dN}{du} = \frac{\Phi}{2} q'^2 \frac{d}{du}\left(\frac{p}{p''}\right)$$

$$N = \frac{\Phi}{2}\int q'^2 \frac{d}{du}\left(\frac{p}{p''}\right) du + C.$$

Digitized by Google

Durch partielle Integration:

$$N = \frac{\Phi}{2}\left[q'^2\frac{p}{p''} - \int \frac{p}{p''} 2\,q'\,q''\,du\right] + C.$$

Vermöge der Beziehung $p'\,p'' + q'\,q'' = 0$ erhält das Integral den Wert p^2.

$$N = \frac{\Phi}{2}\left[q'^2\frac{p}{p''} + p^2\right] + C.$$

Also

$$n_2' = \frac{N}{p\,q'} = \frac{\Phi}{2}\left[\frac{q'}{p''} + \frac{p}{q'}\right] + \frac{C}{p\,q'} = \frac{\Phi}{2}[-R_1 + R_2] + \frac{C}{p\,q'}$$

$$n_2 = n_2' + \frac{\Phi}{2}R_1 = \frac{\Phi}{2}R_2 + \frac{C}{p\,q'}.$$

Die Konstante C bestimmt sich bei vielen Flächen, so bei denen, die als Tragkörper bei Ballonen Verwendung finden, aus der Forderung, daß an den Stellen $p = 0$, wo der Meridian die Rotationsachse schneidet, nicht ∞ große Spannungen auftreten; damit dies nicht eintritt, muß $C = 0$ sein. Für Flächen, bei denen dann nirgends R_2, die Normale unendlich groß ist, sind durch $C = 0$ ∞ große Spannungen vermieden. Für diese wird dann die Meridianspannung

1) $$n_2 = \frac{\Phi}{2}R_2 = \frac{\Phi}{2}\frac{p}{q'};$$

die Ringspannung ergibt sich aus $\frac{n_1}{R_2} + \frac{n_2}{R_1} = \Phi$:

2) $$n_1 = \frac{\Phi}{2}R_2\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right);$$ [1])

die Schubspannung $t = 0$.

Durch Angabe dieser 3 Größen ist der Spannungszustand einer Rotationsfläche, welche konstantem Innendruck unterliegt, vollständig beschrieben. $t = 0$ sagt aus, daß die Krümmungslinien nur normalen Spannungen unterliegen, d. h. Hauptspannungslinien sind; für die Meridianspannung ergibt sich der einfache Satz, daß sie proportional der Normalenlänge R_2 ist. Ebenso leicht gelangt man zu einer graphischen Darstellung der Ringspannung n_1 durch Konstruktion der Strecke: $2R_2 - \frac{R_2^2}{R_1}$. Dies setzt voraus, daß man R_1 der Länge nach kennt. Häufig, besonders bei flachen Meridiankurven, wird dies nicht der Fall sein; dort kann dann folgende Konstruktion eingreifen:

Denken wir uns in den Endpunkten eines Linienelementes Δu die Normalen $AK = BK = R_1$ gezogen (siehe Fig. 4a), ferner $CD \# AB$, dann ist der Inhalt der Rechteckes:

$$ABCD = R_2 \cdot \Delta u$$

da ferner

$$DE = \frac{R_2}{R_1}\Delta u,$$

[1]) Dieselben Formeln erhielt auf anderem Wege H. Prof. Weber-Hannover. Siehe Deutsche Luftfahrerzeitschrift, Heft 13, Jahrg. 1912.

Digitized by Google

ist $$\Delta B D E = \frac{1}{2} \frac{R_2^2}{R_1} \Delta u$$

folglich das Viereck

$$A B C E = \Delta f = \left(R_2 - \frac{R_2^2}{2 R_1}\right) \Delta u = x \cdot \Delta u.$$

Nach Formel 2) ist x aber eben der Faktor, mit welchem Φ zu multiplizieren ist, um die Spannung n_1 zu erhalten. x kann also leicht als Seite eines Rechteckes gefunden werden, dessen eine Seite Δu, dessen Inhalt $= \angle\!\!\!\diagdown A B C E$ ist. (Konstr.: M E = M B, M F ∥ A C; F G ∥ B C; A G = x)

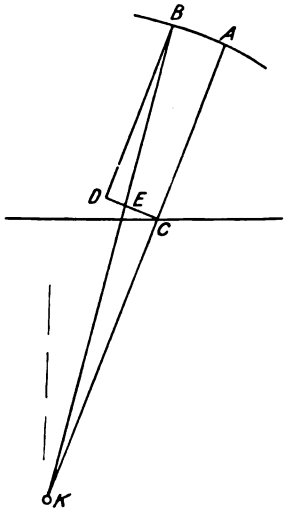


Fig. 4a.

Es erübrigt noch zu untersuchen, welches Zeichen die Hauptspannungen haben. Zu diesem Zweck stellt Fig. 5 einen Rotationskörper vor, der eine mögliche Tragkörperform aufweist. X Y-Ebene ist — wie auch später immer — die Ebene des „Hauptspants"; der Meridian v = 0 ist der obere Teil des vertikalen Meridians; Rotationsachse ist die Z-Achse. Die Bogenlänge wird vom „Bug" an gemessen; z ist positiv zwischen Hauptspant und Bug. Aus der Forderung, daß Meridian-Parallelkreistangente und Flächennormale ein Rechtssystem bilden sollen, ergibt sich, daß die positive Flächennormale von innen nach außen gerichtet ist. Also ist Φ

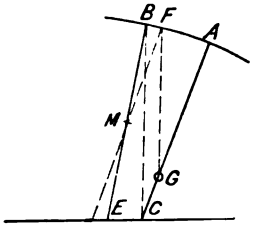


Fig. 4b.

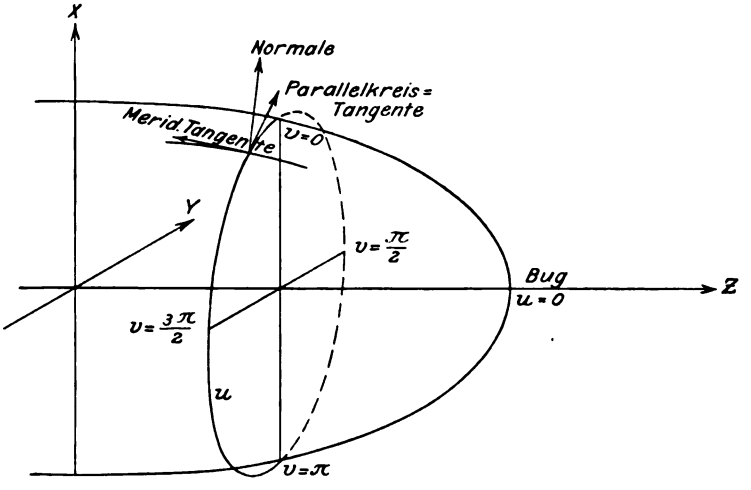


Fig. 5.

positiv, wenn es im Sinne eines Innendrucks wirkt. Weil z mit wachsendem u abnimmt, ist q′ und damit $n_2 = \frac{\Phi}{2} \frac{p}{q'}$ überall negativ; d. h. die Meridianspannung

Digitized by Google

ist überall Zugspannung. Anders ist es mit $n_1 = n_2\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$. Dies ist dort Zugspannung, wo $\frac{R_2}{R_1} < 2$; aber wo $\frac{R_2}{R_1} > 2$ ist, wirkt n_1 als eine Druckspannung; in diesen Gebieten zeigt die Hülle das Bestreben, sich längs der Meridiane in Falten zu legen; während in jenen Teilen, wo $\frac{R_2}{R_1} < 2$, die Fläche aufgebläht ist. Beide Teile werden getrennt durch die Parallelkreise, für welche $\frac{R_2}{R_1} = 2$ ist. Wir können dies auch so aussprechen: die Ringspannungen n_1 sind dort Null, wo Krümmungsmittelpunkt und Normalenmitte zusammenfallen; sie sind Druckspannungen bzw. Zugspannungen dort, wo der Krümmungsmittelpunkt die Strecke Normalenmitte-Meridianpunkt von innen bzw. von außen teilt. Ein Beispiel für eine Fläche mit positiven und negativen Ringspannungen bietet ein abgeflachtes Rotationsellipsoid:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

dessen Achsen der Ungleichung genügen: $\frac{a}{b} < \sqrt{2}$, es liegt dann eine Zone positiver Ringspannungen zu beiden Seiten des Äquators.

Innerhalb der Zone, wo n_1 als Druckspannung wirkt, verlaufen auch die Scherungslinien reell; deren Gleichung ist in unserm Fall:

$$\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) du^2 + p^2\, dv^2 = 0.$$

Auf dem Parallelkreis, für welchen $\frac{R_2}{R_1} = 2$, ist die Richtung der Scherungslinien die von $dv^2 = 0$; d. h. dort fallen beide Linienelemente mit dem Meridian zusammen. Die Scherungslinien sitzen mit Spitzen auf dem Parallelkreis R_2 auf; Spitzentangente ist die Meridiantangente. Alle Scherungslinien gehen natürlich durch Rotation einer von ihnen hervor.

Der Fall positiver Spannungswerte von n_1 tritt bei den als Tragkörper verwendeten Rotationsflächen nicht auf. Vermöge ihrer langgestreckten Form ist bei ihnen $\frac{R_2}{R_1} < 1$, die Bedingung $\frac{R_2}{R_1} > 2$ also nirgends erfüllt. Aus der Formel

$$n_1 = n_2\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$$

folgt dann weiter, daß die Ringspannung überall größer ist als die Meridianspannung; diese erreicht ihr Maximum am Hauptspant. Die größte Spannung ist die nahe dem Hauptspant auftretende maximale Ringspannung, die nach Formel 2) § 1 etwas kleiner als $\Phi \cdot$ Hauptspantradius ist.

Beipielsweise wird bei einem maximalen Radius von 5 m und einem Innendruck von 35 kg/m² die

Digitized by Google

$$\text{größte Meridianspannung } n_2 = \frac{\Phi}{2} R_2 = 87{,}5 \text{ kg/m}$$

$$\text{größte Ringspannung } \qquad n_1 < \Phi \cdot R_2 < 175 \text{ kg/m}.$$

Punkte, in welchen beide Hauptspannungen gleich werden, heißen Nabelpunkte im mechanischen Sinne; in unserem Fall liegen sie dort, wo

$$\frac{\Phi}{2} R_2 = \frac{\Phi}{2} R_2 \left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (n_2 = n_1)$$

also wo

$$R_2 = 0 \text{ oder } R_2 = R_1.$$

Der ersten Bedingung genügen die Schnittpunkte des Meridians mit der Rotationsachse, der zweiten jene Meridianpunkte, für welche beide Hauptkrümmungsradien gleich sind; d. h. die geometrischen Nabelpunkte sind auch Nabelpunkte im mechanischen Sinne.

§ 2.

Wenn die Kräfte rotatorischen Charakter zeigen, ist es immer leicht, zu einer Lösung der Spannungsgleichungen für Rotationsflächen zu gelangen. Ein allgemeiner Fall rotatorischer Belastung ist gegeben bei Annahme einer Normalkraft Φ und einer parallel dem Meridian wirkenden Kraft F_1, welche beide nur von u abhängen. Für diesen Fall ist

$$a = \frac{\Phi}{2} R_1 R_2 = -\frac{\Phi}{2} \frac{p}{p''}$$

wieder nur von u abhängig.

Die Kräfte des Tangentialsystems werden:

$$F_1' = F_1 - \frac{q'}{p} \frac{da}{du}$$

$$F_2' = 0.$$

Bei Annahme nur von u abhängiger Spannungen geben die Spannungsgleichungen außer $T = 0$ noch:

$$\frac{dN}{du} = F_1 p q' - q'^2 \frac{da}{du}$$

$$N = \int F_1 p q' du + \int -q'^2 \frac{da}{du} du + C$$

$$= \int F_1 p q' du - [q'^2 a - \int 2 a q' q'' du] + C$$

$$= \int F_1 p q' du + \frac{\Phi}{2} \frac{p}{p''} q'^2 - \int \Phi \frac{p}{p''} q' q'' du + C$$

$$N = \int F_1 p q' du + \frac{\Phi}{2} \frac{p q'^2}{p''} + \int \Phi p p' du + C$$

$$n_2' = \frac{N}{p q'} = \frac{\int F_1 q' p du}{p q'} + \frac{\Phi}{2} \frac{q'}{p''} + \frac{\int \Phi p p' du + C}{p q'}$$

Digitized by Google

$$n_2 = n_2' + \frac{a}{R_2} = n_2' + \frac{\Phi}{2} R_1 = n_2' - \frac{\Phi}{2} \frac{q'}{p''}$$

$$n_2 = \frac{\int F_1 p q' du + \int \Phi p p' du = C}{p q'}.$$

Zählen wir beide Integrale von einer Stelle $u = 0$ an, wo $p = 0$ wird (— Schnitt des Meridians mit der Rotationsachse —), so können wir unendlich große Spannungen nur dadurch vermeiden, daß $C = 0$ gesetzt wird. Dann ist:

1) $$n_2 = \frac{1}{p q'} \left(\int_0^u F_1 p q' du + \int_0^u \Phi p p' du \right).$$

Ringspannung n_1 berechnet sich wieder aus

$$\frac{n_1}{R_2} + \frac{n_2}{R_1} = \Phi$$

2) $$n_1 = \Phi R_2 - \frac{R_2}{R_1} n_2 = \Phi \frac{p}{q'} + \frac{p''}{q'^3} \left(\int_0^u F_1 p q' du + \int_0^u \Phi p p' du \right).$$

Schubspannung: $t = 0$.

§ 3.

Anwendung dieser Formeln.

Die bis jetzt erhaltenen Resultate sollen nun zur zahlenmäßigen Berechnung der an einem Tragkörper auftretenden Spannungen verwendet werden, wenn als Kräfte ein konstanter Innendruck und der sogenannte Strömungsdruck wirken. Dieser entsteht infolge der relativen Bewegung der Luft gegen den Tragkörper und macht in seiner Gesamtheit den Druckwiderstand des Fahrzeugs aus. In der Göttinger Modellversuchsanstalt wurde die Größe des Strömungsdruckes an mehreren Modellen ermittelt[1]). Für das Modell IV (Modell III der früheren Abhandlung) wurden dem Verfasser von Herrn Prof. Dr. Prandtl Abmessungen und Verlauf des Strömungsdruckes in entgegenkommendster Weise mitgeteilt, wofür an dieser Stelle der gebührende Dank ausgesprochen wird.

Wir berechnen die Spannungen für einen Tragkörper, der die Form des Modells IV besitzt; sein Meridian ist auf den Fig. I, II, III in 500 facher Verkleinerung wiedergegeben. Die Hauptabmessungen sind:

Länge	61,01 m
Maxim. Durchmesser . . .	10,00 „
Hauptspantquerschnitt . . .	78,54 m²
Volumen	$V = 27\,40$ m³
Oberfläche	$O = 1356$ m².

Außerdem gibt Tabelle I für 55 Punkte des Meridians die Abszissen Z und Ordinaten x, aus denen vermittelst der Differenzenquotienten $\frac{x_n - x_{n-1}}{z_n - z_{n-1}}$

[1]) Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt. Jahrg. 1910. Heft 8; 1911 Heft 13.

Digitized by Google

die Neigung der Meridiantangente und damit p′ und q′ abgeleitet wurden. Ferner wurde in diesen Punkten die Normale konstruiert und deren Länge R_2 sowie die Länge des Krümmungsradius R_1 abgemessen; letzterer erreicht schon vom ersten Drittel ab so große Werte, daß das Verhältnis $\frac{R_2}{R_1}$ von dort ab vernachlässigt wurde.

Mit diesen Werten der R_1 und R_2 wurde bei Annahme eines konstanten Innendruckes $\Phi_0 = 25\,\text{kg/m}^2$ nach den Formeln 1 und 2 des § 1 die Spannungen berechnet, die in Tabelle I unter $(n_2)_\varphi$ und $(n_1)_\varphi$ aufgeführt sind. Dieser Tabelle oder auch der Fig. I entnehmen wir, daß beide Spannungen, von dem gemeinsamen Wert $-14\,\text{kg/m}$ am Bug ausgehend, ihr Maximum am Hauptspantquerschnitt von $n_2 = -62{,}5\,\text{kg/m}$, $n_1 = -125\,\text{kg/m}$ erreichen, um dann bis zum Werte 0 am Heck abzufallen. Die Ringspannung ist überall die größere, weil $\frac{R_2}{R_1}$ immer < 1 ist.

Der Strömungsdruck wirkt überall normal zur Fläche und zwar im vordern Teil als Außendruck, der seinen Maximalwert $\frac{v^2\gamma}{2g}$ am Bug hat; längs des Rumpfes ist er von der Hülle weggerichtet und wirkt am Heck wieder als Außendruck. Sein Verlauf wird durch den Ausdruck $\varepsilon \cdot \frac{v^2\gamma}{2g}$ wiedergegeben; hierin bedeutet ε einen Faktor, dessen Werte für 55 Punkte des Meridians in Tabelle I nach Mitteilung von Herrn Prof. Prandtl eingetragen sind. v ist die Geschwindigkeit des Fahrzeugs relativ zur ruhenden Luft, $\gamma = 1{,}29\,\text{kg/m}^3$ das Gewicht von 1 cbm Luft, $g = 9{,}8\,\text{m/sec}^2$.

Die Geschwindigkeit v besitze den Wert 15 m/sec; dann ist der Normaldruck der Strömung am Bug $= 14{,}78\,\text{kg/m}^2$. Die Druckkomponente, welche die Richtung der Rotationsachse besitzt, bildet den Druckwiderstand des Tragkörpers, der sich in der Form schreiben läßt:

$$W = 0{,}00816\, V^{9/4} \frac{v^2\gamma}{g}.$$

In unserem Fall $= 47{,}2\,\text{kg}$.

Um diesen Widerstand zu überwinden, muß durch den Motor eine dem Widerstand gleich große Kraft auf den Tragkörper übertragen werden. Verteilen wir diese Kraft gleichmäßig auf einen Reifen, der sich mit dem Parallelkreis u_0, p_0, q_0 deckt, so erleidet dort die Spannung einen Sprung n, der gleich der spezifischen Belastung des Reifens ist, und sich aus der Gleichung bestimmt:

$$2\,n\,\pi\,p_0\,q_0' = 2\,\pi \int_0^l \Phi\,p\,p'\,du = W$$

$$n = \frac{\int_0^l \Phi\,p\,p'\,du}{p_0\,q_0'}.$$

Bezeichnen wir die Spannung jener Elemente, welche im Sinne der Bewegung des Tragkörpers vor dem Reifen liegen, mit $(n_2)_v^\varphi$, die übrigen mit $(n_2)_h^\varphi$, so besteht am Parallelkreis $u_0\,p_0\,q_0'$ die Beziehung:

$$(n_2)_h - (n_2)_v = -n.$$

Digitized by Google

Nach der Formel 1 von § 2 ist nun:

$$(n_2)^{\Phi} = \frac{\int_0^u \Phi\, p\, p'\, du + C}{p\, q'}.$$

Damit nun $(n_1)^{\Phi}$ bei $u = 0$ $p = 0$ endlich bleibt, muß $C = 0$ sein. Daher ist

1) $(n_2)_v^{\Phi} = \frac{1}{p\, q'} \int_0^u \Phi\, p\, p'\, du = \frac{1}{2\, p\, q'} \int_0^u \Phi\, dp^2$, die Spannung vor der Fesselung.

Auch für $u = l$ = Länge des Meridians dürfen die Spannungen nicht unendlich werden; d. h. es ist für den Teil hinter der Fesselung $C = -\int_0^l \Phi\, p\, p'\, du$ zu wählen; also:

$$(n_2)_h^{\Phi} = \frac{\int_0^u \Phi\, p\, p'\, du - \int_0^l \Phi\, p\, p'\, du}{p\, q'} = \frac{\int_l^u \Phi\, p\, p'\, du}{p\, q'} = \frac{1}{2\, p\, q'} \int_l^u \Phi\, d\, p^2.$$

An dem Reifen, der den Schraubenantrieb zu übertragen hat, bildet sich der Sprung aus:

2) $$(n_2)_h - (n_2)_v = \frac{\int_l^u \Phi\, p\, p'\, du - \int_0^u \Phi\, p\, p'\, du}{p\, q'} = -\frac{\int_0^l \Phi\, p\, p'\, du}{p\, q'}$$

$$= -n = \text{spezifischer Belastung an diesem Reifen.}$$

Die zahlenmäßige Berechnung der vom Strömungsdruck verursachten Spannungen wurde für 2 verschiedene Stellen der Fesselung durchgeführt: im ersten Fall ist die Fesselung an einem Parallelkreis gedacht, dessen Ebene ca. 2 m vom Bug entfernt ist; im zweiten Fall wird die Fesselung am Hauptspantquerschnitt vorgenommen. Gemäß der Formeln 1 und 2 wurde Φ als Funktion von p^2 aufgetragen, das Integral $\int_0^u \Phi\, d(p^2)$ bzw. $\int_l^u \Phi\, d(p^2)$ mit dem Integraphen ausgewertet und mit dem jeweiligen Werte von $2\, p\, q'$ dividiert. Die Gleichung $\frac{n_1}{R_2} + \frac{n_2}{R_1} = \Phi$ lieferte dann den entsprechenden Wert von n_1. Die Tabelle I und Fig. II zeigen den Verlauf der vom Strömungsdruck verursachten Spannungen:

Bei Fesselung I ist die Meridianspannung am Bug eine Druckspannung von ~ 9 kg/m, erleidet bei der Fesselung einen Sprung von $+ 6{,}6$ auf $+ 2{,}5$ kg/m, ist im zweiten und dritten Viertel Zugspannung mit dem Maximalbetrag von ~ 2 kg/m am Hauptspant; im letzten Viertel wirkt sie wieder als Druckspannung, erreicht jedoch nur mehr den Höchstbetrag von $\sim 0{,}7$ kg/m, am Heck ist ihr Wert 0. Die Ringspannung besitzt am Bug ebenfalls den Wert ~ 9 kg/m, an der Fesselung bildet sich ein Spannungssprung von $+ 1{,}6$ auf $2{,}7$ kg/m. Bei einem Parallelkreis, der nahe hinter der Fesselung liegt, geht n_1 in eine Zugspannung über, erreicht sein Maximum 13 kg/m etwas vor dem Hauptspantquerschnitt; im letzten Fünftel wirkt n_1 wieder als Druckspannung (Maximum 1,2 kg/m) und wird am Heck Null.

Die Fesselung am Hauptspantquerschnitt verändert dieses Bild nur wenig: der Übergang zu Zugspannungen erfolgt bei n_2 nicht so weit vorne, etwa beim Beginn

Digitized by Google

des zweiten Viertels; Maximum und Minimum beider Spannungen werden sowohl in Lage als auch in Größe nur wenig verändert; am Hauptspantquerschnitt entsteht der Sprung von 1,5 kg/m, so daß der vom Reifen übertragene Zug =

$$2\,\pi \cdot R \cdot 1{,}5 = 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 1{,}5 = 47{,}2\,\text{kg}$$

gleich dem früher berechneten Druckwiderstand wird.

Ein übersichtliches Bild über die Art der Spannungen gewähren die folgenden beiden schematischen Figuren.

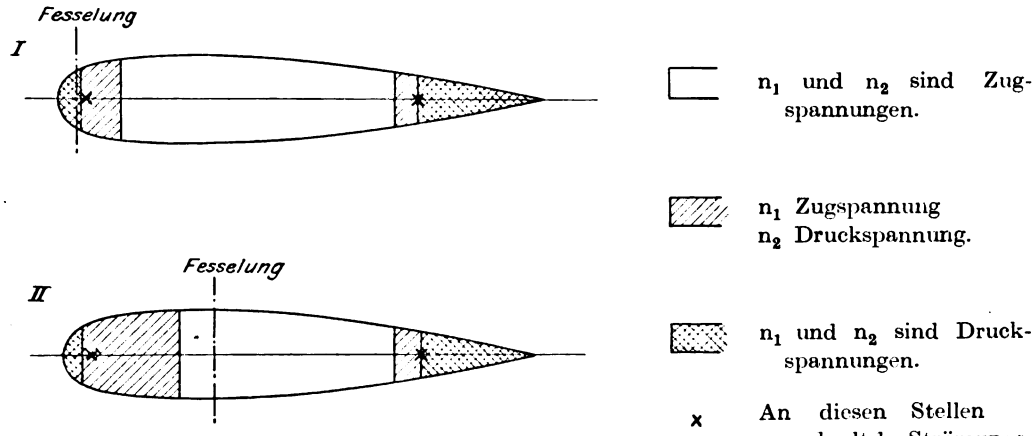


Fig. 6.

Wir entnehmen diesen Figuren, daß bei bloßer Wirkung des Strömungsdruckes die Hülle ganz vorne und ganz hinten nur auf Druck beansprucht würde und sich daher dort zusammenknüllen würde; soll dies vermieden werden, so muß ein Innendruck von mindestens der Größe $\frac{v^2 \gamma}{2g} = 14{,}78\,\text{kg/m}^2$ wirken. Längs des Rumpfes wirkt der Strömungsdruck im Sinne einer Vergrößerung der von einem konstanten Innendruck herrührenden Spannungen; und zwar wird die maximale Zugspannung, die der Innendruck $\Phi_0 = 25\,\text{mm Wasser} = 25\,\text{kg/m}^2$ am Hauptspant erzeugt, um ca. 10 % vergrößert, indem die Ringspannung 125 kg/m um ~ 13 kg/m erhöht wird. In den Zonen II und IV ist nur mehr n_2 eine Druckspannung, die Hülle würde sich dort unter bloßer Wirkung des Innendrucks längs der Parallelkreise in Falten legen.

Außer dem Druckwiderstand erfährt ein in Fahrt befindliches Luftschiff auch noch Reibungswiderstand, verursacht durch die Reibung zwischen Hülle und umgebender Luft. Wird er auf die Form gebracht: $W_R = \alpha \overline{O^2}^{\beta} v^{\beta}$, so besitzen für die Form des Modells IV α und β die Werte[1]):

$$\alpha = 0{,}000\,25, \quad \beta = 1{,}49;$$

sonach finden wir für das Beispiel einen Reibungswiderstand:

$$W_R = 0{,}000\,25 \cdot 1356^{0{,}745} \cdot 15^{1{,}49} = 30{,}47\,\text{kg}.$$

[1]) Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt 1911, Heft 13.

Digitized by Google

Der Reibungswiderstand dR, den ein Element dF des Tragkörpers erfährt, wirkt wie eine Kraft im Sinne der Bewegung, mit welcher die Luft an dem als ruhend gedachten Tragkörperelement entlang streicht; diese Kraft sei, abgesehen von dem Flächeninhalt dF des Elements, auch noch dem Quadrat der Geschwindigkeit w proportional, mit welcher die Luft an dem Element entlang streicht. Bezeichnet a einen Proportionalitätsfaktor, dann kann also dR dargestellt werden durch

$$dR = a\,dF\,w^2 = a \cdot 2\,p\,\pi\,du \cdot w^2,$$

wenn unter dF das von 2 ∞ nahen Parallelkreisen begrenzte Stück verstanden ist In Richtung der Rotationsachse fällt davon die Komponente:

$$dR \cdot \cos\alpha = 2\,a\,\pi\,p\,w^2\,du\cos\alpha = 2\,a\,\pi\,p\,w^2\,dz.$$

Diese Komponente gibt in ihrer Gesamtheit den oben berechneten Reibungswiderstand W_R:

$$W_R = \int_0^\lambda dR\cos\alpha = 2\,a\,\pi\int_0^\lambda p\,w^2\,dz = 30{,}47\text{ kg}.$$

[λ ist die Länge des Luftschiffes, in der Rotationsachse gemessen]. Daraus finden wir den Faktor a:

$$a = \frac{W_R}{2\,\pi\int_0^\lambda p\,w^2\,dz},$$

und daher die Meridiankraft F_1, welche durch die Luftreibung auf die Flächeneinheit ausgeübt wird:

$$3)\qquad F_1 = \frac{dR}{dF} = a\,w^2 = \frac{W_R \cdot w^2}{2\,\pi\int_0^\lambda p\,w^2\,dz}\ [\text{kg/m}^2].$$

Das hierin noch unbekannte w^2 liefert uns die für stationäre Strömung geltende Gleichung

$$\frac{1}{2}\,w^2\,\frac{\gamma}{g} + \Phi = \text{const},$$

worin Φ wieder den Strömungsdruck bedeutet; am Bug ist $w = 0$ und $\Phi = \overline{\Phi} = \frac{v^2\gamma}{2\,g}$, also

$$\frac{1}{2}\,w^2\,\frac{\gamma}{g} + \Phi = \overline{\Phi}$$

$$w^2 = \frac{2g}{\gamma}(\overline{\Phi} - \Phi) = \frac{2g}{\gamma}\,\overline{\Phi}\,(1 - \varepsilon).$$

Also wird

$$4)\qquad F_1 = \frac{W_R\,(1-\varepsilon)}{2\,\pi\int_0^\lambda p\,(1-\varepsilon)\,dz} = 4{,}86\,\frac{1-\varepsilon}{\int_0^\lambda p\,(1-\varepsilon)\,dz}\ [\text{kg/m}^2].$$

Der Integrand p (1 — ε) wurde als Funktion von z aufgetragen und das Integra mit dem Planimeter ausgewertet. So erhielten wir:

$$F_1 = 0{,}020\,(1-\varepsilon)\ [\text{kg/m}^2]$$

Digitized by Google

Wie wir aus Tabelle I unter Kolonne F_1 ersehen, sind die durch Reibung verursachten Tangentialkräfte verhältnismäßig klein; beträgt doch $(F_1)_{max}$ nur

$$0{,}02\,(1 + 0{,}176) = 0{,}0235\ \text{kg/m}^2 = 23{,}5\ \text{g/m}^2.$$

Damit bleiben auch die Spannungen, die von der Tangentialkraft F_1 erzeugt werden, verhältnismäßig klein. Nach Formel 1 § 2 ist diese Meridianspannung:

$$(n_2)^R = \frac{\int_0^u F_1\, p\, q'\, du + C}{p\, q'}.$$

Es würde nur eine Wiederholung des bei Behandlung des Strömungsdruckes Gesagten bedeuten, wenn wir ableiten, daß vor der Fesselung, welche eine dem Reibungswiderstand gleich große Kraft auf den Tragkörper überträgt, C den Wert 0, hinter der Fesselung den Wert $\int_0^l F_1\, p\, q'\, du$ besitzt. Sonach gilt

5)
$$(n_2)^R_{vor} = \frac{\int_0^u F_1\, p\, q'\, du}{p\, q'} = \frac{\int_0^z F_1\, p\, dz}{p\, q'}$$

$$(n_2)^R_{hinter} = \frac{\int_l^u F_1\, p\, q'\, du}{p\, q'} = \frac{\int_\lambda^z F_1\, p\, dz}{p\, q'}$$

An der Fesselung tritt ein Sprung in der Meridianspannung ein von dem Betrag:

$$(\Delta n_2) = (n_2)^R_{vor} - (n_2)^R_{hinter} = \frac{\int_0^{u_0} F_1\, p\, q'\, du - \int_l^{u_0} F_1\, p\, q'\, du}{p_0\, q_0'}$$

Daraus:

$$2\, p_0\, \pi\, q_0'\, \Delta n_2 = 2\pi \int_0^l F_1\, p\, q'\, du = \int_0^l F_1\, dF \cos\alpha = \int_0^l \frac{dR}{dF}\, dF \cos\alpha = W_R\,.$$

Die zahlenmäßige Ermittlung der durch Reibung verursachten Spannungen wurde so durchgeführt, daß die Werte von $F_1 \cdot p$ als Funktion von z aufgezeichnet wurden, das Integral mit dem Planimeter ausgewertet, und mit dem jeweiligen Wert von $p\, q'$ dividiert wurde. Bei Annahme der schon im vorigen Beispiel verwendeten Fessselungsstellen resultierten so die in Tabelle I wiedergegebenen Werte für n_2. Auch aus der Fig. III entnehmen wir, daß die Meridianspannung am Bug Null ist, vor der Fesselung als Druckspannung, hinter der Fesselung als Zugspannung wirkt, die am Heck wieder Null wird. Die Maxima der Druck- und Zugspannungswerte von n_2 liegen immer an der Fesselungsstelle und betragen

bei Fesselung I + 22 g/m (Druckspannung),
— 2610 g/m (Zugspannung);
bei Fesselung II + 380 g/m (Druckspannung),
— 590 g/m (Zugspannung).

Die Ringspannung berechnet sich einfach aus:

$$\frac{n_1}{R_2} + \frac{n_2}{R_1} = 0; \quad n_1 = -\frac{R_2}{R_1}\, n_2.$$

Digitized by Google

Wie aus dieser Gleichung erhellt, hat n_1 das entgegengesetzte Zeichen von n_2: es ist daher n_1 Zugspannung vor und Druckspannung hinter der Fesselung. Die Maxima der Ringspannung treten jedesmal bei der Fesselung auf, und zwar in dem Betrage:

Fesselung I: — 7 g/m Zugspannung,
+ 770 g/m Druckspannung;
Fesselung II: — 10 g/m Zugspannung,
+ 10 g/m Druckspannung.

Etwa vom Hauptspantquerschnitt an nähert sich n_1 sehr dem Werte Null wegen der Kleinheit des Verhältnisses $\frac{R_2}{R_1}$.

Rechnen wir die hier berechneten Spannungen den früher aus dem Strömungsdruck resultierenden hinzu, so zeigt sich nur eine geringe Abänderung der dort besprochenen Verhältnisse; vor allem bleibt das frühere Maximum, abgesehen von einer geringen Verkleinerung, ungeändert.

Die Reibung der Luft an der Hülle bringt also im Vergleich mit den andern Kräften nur ganz geringe Spannungen hervor, welche außerdem noch im Sinne einer Verkleinerung der maximalen Spannungen wirken. Der Einfluß der Reibung auf die Spannung der Hülle kann also vernachlässigt werden.

§ 4.

Um der Wirklichkeit näher zu treten, werden nunmehr als äußere Kräfte ein pro Flächeneinheit konstantes Gewicht μ kg/m² der Hülle angenommen; der Normaldruck Φ bestimme sich aus der tatsächlich erfüllten Bedingung, daß sowohl der Druck der Außenluft wie der des Füllgases proportional mit der Höhe abnimmt.

Ist nämlich Π_0 der Druck der Luft in Höhe der horizontalen Rotationsachse, dann herrscht, soweit es sich nicht um zu große Höhenabmessungen handelt, in der Höhe h über der Achse der Druck $\Pi_0 - \gamma h$, wo $\gamma = 1{,}3$ kg/m³ das Gewicht eines Kubikmeters Luft bedeutet. Sind P_0 und g die analogen Daten für das Füllgas, so wirkt in h m Höhe ein Gasdruck $P_0 - g h$, also ein innerer Überdruck:

$$\begin{aligned}(P_0 - g h) - (\Pi_0 - \gamma h) &= (P_0 - \Pi_0) + (\gamma - g) h \\ &= \Phi_0 + k h,\end{aligned}$$

wenn mit Φ_0 abkürzend der innere Überdruck am horizontalen Meridian, mit k die Differenz $\gamma - g$ bezeichnet wird; diese ist bei Wasserstoffüllung $\sim = 1{,}1$ kg/m³, bei Leuchtgas $\sim = 0{,}7$ kg/m³.

Der Innendruck wächst also proportional mit der Höhe; dadurch erfährt der Rotationskörper einen Auftrieb = k × Volumen = k · V, indem er sich ebenso verhält wie ein in eine Flüssigkeit mit dem spezifischen Gewichte k getauchter Körper, auf dessen Oberfläche dann ein mit der Höhe proportional abnehmender Außendruck wirkt.

Diesem Auftrieb entgegen, d. h. in Richtung der negativen X-Achse wirkt das Gewicht der Hülle = μ kg/m²; nach den am Schluß der Einleitung angegebenen

Digitized by Google

Formeln für die Richtungskosinusse hat die Kraft μ in bezug auf U- und V-Linie und Flächennormale die Komponenten:

$$\begin{aligned} F_1 &= -\mu\,\alpha_1 = -\mu\,p'\cos v \\ F_2 &= -\mu\,\alpha_2 = +\mu\sin v \\ \Phi &= -\mu\,\alpha_3 = +\mu\,q'\cos v \end{aligned}$$

Da h in $\Phi_0 + k\,h$ den Wert $p\cos v$ hat, erhalten wir das folgende System äußerer Kräfte:

$$\begin{aligned} F_1 &= -\mu\,p'\cos v \\ F_2 &= \mu\sin v \\ \Phi &= \Phi_0 + (k\,p + \mu\,q')\cos v \end{aligned}$$

Die durch Φ_0 verursachten Spannungen sind bereits in § 1 untersucht; wir nehmen daher als Normaldruck nur noch $(k\,p + \mu\,q')\cos v$ und stellen das Tangentialsystem her:

$$a = -\frac{\Phi}{2}\frac{p}{p''} = -\frac{p}{2\,p''}(k\,p + \mu\,q')\cos v$$

$$F_1' = F_1 - \frac{q'}{p}\frac{\partial a}{\partial u} = -\mu\,p'\cos v - \frac{q'}{p}\cos v\,\frac{d\,-\frac{p}{2\,p''}(k\,p+\mu\,q')}{du}$$

1) $$= U_I(u)\cos v$$

$$F_2' = F_2 + \frac{p''}{p\,q'}\frac{\partial a}{\partial v} = \mu\sin v + \frac{p''}{p\,q'}\frac{p}{2\,p''}(k\,p+\mu\,q')\sin v = U_{II}(u)\sin v.$$

Damit werden die Spannungsgleichungen:

I
$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial u} + \frac{q'}{p^2}\frac{\partial T}{\partial v} &= F_1'\,p\,q' = p\,q'\,U_I(u)\cos v \\ \frac{\partial T}{\partial u} + \frac{p\,p''}{q'^3}\frac{\partial N}{\partial v} &= F_2'\,p^2 = p^2\,U_{II}(u)\sin v \end{aligned}$$

Oder:

I'
$$\begin{aligned} N_u + u_1\,T_v &= U_1(u)\cos v \\ N_v + u_2\,T_u &= U_2(u)\sin v \end{aligned}$$

Hierin sind u_1, u_2, U_1, U_2 nur Funktionen von u:

$$u_1 = \frac{q'}{p^2} \qquad u_2 = \frac{q'^3}{p\,p''}$$

2)
$$U_1 = -p\,q'\left(\mu\,p' + \frac{q'}{p}\frac{d}{du}\left(-\frac{p}{2\,p''}(k\,p+\mu\,q')\right)\right)$$

$$U_2 = \frac{p\,q'^3}{p''}\left(\mu + \frac{1}{2q'}(k\,p + u\,q')\right)$$

Aus den beiden partiellen Differentialgleichungen leiten wir eine her, indem wir N eliminieren. Zu diesem Zweck differenzieren wir die erste nach v, die zweite nach u und subtrahieren; dann erhalten wir für T die partielle Differentialgleichung 2. Ordnung:

II
$$u_2\,T_{uu} - u_1\,T_{vv} + u_2'\,T_u = (U_1 + U_2')\sin v$$

Digitized by Google

Hierin ist

$$u_2' = \frac{du_2}{du} \qquad U_2' = \frac{dU_2}{du}.$$

Es gelingt nun leicht, für diese Differentialgleichung eine partikuläre Lösung zu finden, wenn wir für diese die Form annehmen:

3) $$T = \Theta(u) \sin v;$$

dann werden die Ableitungen:

$$T_u = \Theta' \sin v \qquad T_{uu} = \Theta'' \sin v$$
$$T_v = \Theta \cos v \qquad T_{vv} = -\Theta \sin v;$$

dies substituieren wir in Gleichung II:

$$u_2 \Theta'' \sin v + u_2' \Theta' \sin v + u_1 \Theta \sin v = (U_1 + U_2') \sin v.$$

Hier fällt v ganz hinweg, so daß für $\Theta(u)$ noch die gewöhnliche Differentialgleichung 2. Ordnung bleibt:

III $$u_2 \frac{d^2\Theta}{du^2} + u_2' \frac{d\Theta}{du} + u_1 \Theta = (U_1 + U_2').$$

Ist ein partikuläres Integral Θ dieser Gleichung gefunden, so ist in $T = \Theta(u) \sin v$ ein partikuläres Integral der Spannungsgleichung gefunden; aus diesem leiten wir sehr leicht ein partikuläres Integral für N ab, so daß also nach dem in der Einleitung erwähnten Satze Lecornus die Aufgabe auf das Problem der infinitesimalen Verbiegung zurückgeführt ist.

Die Bestimmung des Wertes von N, der dem partikulären Intregal für T entspricht, vollzieht sich durch Substitution dieses T in beide Spannungsgleichungen I; diese werden dann:

$$N_u = (U_1 - u_1 \Theta) \cos v$$
$$N_v = (U_2 - u_2 \Theta') \sin v.$$

Durch Integration ergibt sich einerseits:

$$N = \cos v \int (U_1 - u_1 \Theta)\, du + \varphi_1(v)$$
$$N = -\cos v\, (U_2 - u_2 \Theta') + \varphi_2(u).$$

Nun läßt sich aber die Differentialgleichung für Θ auf die Form bringen:

$$d(u_2 \Theta' - U_2) = (U_1 - u_1 \Theta)\, du.$$

Daher wird der erste Ausdruck für N:

$$N = -(U_2 - u_2 \Theta') \cos v + \varphi_1(v).$$

Die Gleichheit der beiden Ausdrücke fordert $\varphi_1(v) = \varphi_2(u)$, was nur durch $\varphi_1 = \varphi_2 = \text{const}$ erfüllt werden kann; diese Konstante können wir unbeschadet der Allgemeinheit gleich Null annehmen. So stellen

$$T = \Theta(u) \sin v$$
$$N = (u_2 \Theta' - U_2) \cos v$$

partikuläre Lösungen der allgemeinen Spannungsgleichungen vor. Die partikuläre Lösung des Tangentialsystems ist daher:

Digitized by Google

$$t' = \frac{T}{p^2} = \frac{\Theta}{p^2} \sin v$$

5) $$n_2' = \frac{N}{p\,q'} = \frac{u_2\,\Theta' - U_2}{p\,q'} \cos v$$

$$n_1' = \frac{p\,p''}{q'^2}\, n_2' = \frac{p''}{q'^3}\,(u_2\,\Theta' - U_2) \cos v$$

wobei Θ aus Gleichung III zu finden ist.

Umformung der Gleichungen II und III.

Aus den des zweiten Gliedes beraubten Spannungsgleichungen:

$$\overline{N}_u + u_1 \overline{T}_v = 0$$
$$\overline{N}_v + u_2 \overline{T}_u = 0$$

welche die Gleichungen der infinitesimalen Biegung darstellen, leiten wir durch Elimination von $\overline{N}$ eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung für $\overline{T}$ her:

6) $$u_2 \overline{T}_{uu} - u_1 \overline{T}_{vv} + u_2' \overline{T}_u = 0$$

Um diese auf die charakteristische Form der Verbiegungsgleichung zu bringen, führen wir für u eine neue Variable w ein, definiert durch:

7) $$w = \int \sqrt{-\frac{u_1}{u_2}}\, du; \qquad \frac{dw}{du} = w' = \sqrt{-\frac{u_1}{u_2}} \qquad u_2\, w'^2 = -u_1.$$

Dann wird:

$$\frac{\partial \overline{T}}{\partial u} = \frac{\partial \overline{T}}{\partial w}\, w' \qquad = \overline{T}_w \cdot w'$$

$$\frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial u^2} = \frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial w^2}\, w'^2 + \frac{\partial \overline{T}}{\partial w}\, w'' = \overline{T}_{ww}\, w'^2 + \overline{T}_w\, w''$$

und Gleichung 6) wird:

$$u_2 (w'^2 \overline{T}_{ww} + w'' \overline{T}_w) - u_1 \overline{T}_{vv} + u_2' \overline{T}_w \cdot w' = 0$$
$$u_2\, w'^2 \overline{T}_{ww} - u_1 \overline{T}_{vv} + \frac{du_2\, w'}{du} \overline{T}_w = 0$$

oder nach 7):

8) $$\overline{T}_{ww} + \overline{T}_{vv} = \frac{1}{u_1} \frac{d\sqrt{-u_1 u_2}}{du} \overline{T}_w.$$

Dies behandeln wir weiter durch die Substitution:

9)
$$\overline{T} = \vartheta \cdot W\,(w)$$
$$\overline{T}_w = \vartheta_w \cdot W + \vartheta \cdot W'$$
$$\overline{T}_{ww} = \vartheta_{ww} \cdot W + 2\,\vartheta_w \cdot W' + \vartheta\, W''$$
$$\overline{T}_{vv} = \vartheta_{vv} \cdot W.$$

Die Gleichung 8) wird dann:

$$W\,\vartheta_{ww} + 2\,W'\,\vartheta_w + \vartheta\, W'' + \vartheta_{vv} W = U\,(W\,\vartheta_w + \vartheta\, W')$$

Digitized by Google

worin

$$U = \frac{1}{u_1} \frac{d\sqrt{-u_1 u_2}}{du}$$

gesetzt ist.

Wir wählen nun W so, daß der Faktor von ϑ_w verschwindet; zu diesem Zweck muß:

$$2W' - UW = 0$$

$$\frac{d \lg W}{dw} = \frac{U}{2};$$

$$\frac{d \lg W}{du} = \frac{U}{2}\frac{dw}{du} = \frac{1}{2}\frac{d\sqrt{-u_1 u_2}}{du} \cdot \frac{1}{u_1} \cdot \sqrt{-\frac{u_1}{u_2}} = \frac{1}{2}\frac{d \lg \sqrt{-u_1 u_2}}{du}$$

10) $$W = c\sqrt[4]{-u_1 u_2}$$

Da $$W' = \frac{U \cdot W}{2} = \frac{dW}{du}$$

$$\frac{d^2W}{dw^2} = W'' = \frac{1}{2}(UW' + U'W) = \frac{1}{2}\left(\frac{U^2 W}{2} + W \cdot U'\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{U^2 W}{2} + W\frac{dU}{dw}\right)$$

so erhalten wir schließlich:

11) $$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial v^2} = \vartheta \frac{U^2 - 2\frac{dU}{dw}}{4} = \varphi_{(u)}\vartheta;$$

in dieser Form ist die charakteristische Gleichung der infinitesimalen Verbiegung auch in Bianchi: „Differentialgeometrie“ wiedergegeben.

Nehmen wir mit Gleichung II dieselben Umwandlungen vor, so erhält sie die Form:

II′ $$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial v^2} - \frac{U^2 - 2\frac{dU}{dw}}{4}\vartheta = -\frac{U_1 + \frac{dU_2}{du}}{u_1 W}\sin v$$

Setzen wir dafür eine partikuläre Lösung an von der Form: $\vartheta = \delta(w)\sin v$ so folgt für δ die gewöhnliche Differentialgleichung:

III′ $$\frac{d^2\delta}{dw^2} - \delta(w)\left(1 + \frac{U^2 - 2\frac{dU}{dw}}{4}\right) = -\frac{U_1 + \frac{dU_2}{du}}{u_1 W.}$$

Sind die allgemeinen Lösungen der Gleichungen 6 und III oder von 11 und III′ gefunden, dann ergibt sich der allgemeine Wert von T zu:

$$T = \Theta(u)\sin v + \overline{T}$$

Für N folgt daraus aus den Gleichungen I′:

einerseits: $$N = (u_2\Theta' - U_2)\cos v - \int u_1 \overline{T}_v\, du + \varphi_1(v)$$

andererseits: $$N = (u_2\Theta' - U_2)\cos v - u_2 \int \overline{T}_u\, dv + \varphi_2(u)$$

Digitized by Google

Es ist aber: $$-u_2 \int \overline{T}_u \, dv = \int -u_2 \left(\int \overline{T}_{uu} \, dv\right) du - \iint u_2' \overline{T}_u \, du \, dv$$
$$= -\iint (u_2 \overline{T}_{uu} + u_2' \overline{T}_u) \, du \, dv$$
$$= (\text{nach Gl. 6}) = -\iint u_1 \overline{T}_{vv} \, du \, dv = -\int u_1 \overline{T}_v \, du - \int u_1 \Psi_2(u) \, du.$$

Damit wird auch der 2. Wert von N:

$$= (u_2 \Theta' - U_2) \cos v - \int u_1 T_v \, du + \chi_2(u)$$

Die Gleichheit beider Ausdrücke fordert:

$$\varphi_1(v) = \chi_2(u) = \text{const.}$$

So erhalten wir die allgemeinen Spannungswerte:

IV
$$T = \Theta(u) \sin v + \overline{T}$$
$$N = (u_2 \Theta' - U_2) \cos v - \int u_1 \overline{T}_v \, du + C,$$

aus welchen dann einfach die Werte von n_1 n_2 und t berechnet werden können; es ist ja

$$t = -\frac{T}{p^2}; \quad n_2 = \frac{N}{pq'} + \frac{\Phi}{2} R_1; \quad \frac{n_1}{R_2} + \frac{n_2}{R_1} = \Phi.$$

Das Auffinden von $\overline{T}$ wird im allgemeinen Schwierigkeiten bereiten, indem erst die allgemeine Lösung von 6 und dann die in dieser Lösung auftretenden beiden willkürlichen Funktionen zu bestimmen sind. Einfach gestaltet sich die Arbeit für Flächen mit der Eigenschaft

12)
$$u_1 \cdot u_2 = \text{const} = -\frac{1}{a^2}$$
$$\text{d. h.} \quad \frac{q'}{p^2} \cdot \frac{q'^3}{p\,p''} = \frac{q'^4}{p^3 p''} = \text{const} = \frac{-1}{a^2}$$

Wie Lecornu gezeigt hat, kommt diese Eigenschaft nur den Rotationsflächen 2. Grades zu. Für diese wird Gleichung 8 zur Laplaceschen Gleichung:

13)
$$\frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial v^2} = 0,$$

mit der allgemeinen Lösung: $\overline{T} = \varphi(w + i\,v) + \psi(w - i\,v)$.

Daß die Beziehung $u_1 \cdot u_2 = \text{const} = -\frac{1}{a^2}$ nur für Rotationsflächen 2. Grades gilt, erkennen wir unabhängig von Lecornus Beweis auch auf folgende Art: Die Gleichung der Asymptotenlinien einer Rotationsfläche ist:

$$\frac{dv}{du} = \pm \sqrt{\frac{p''}{p\,q'^2}} \text{ (Scheffers)}$$

in unserem Falle wird dies:

$$\frac{dv}{du} = \pm \sqrt{-\frac{a^2 q'^4}{p^3 \cdot p\,q'^2}} = \pm\, a \cdot i \frac{q'}{p^2}$$

Außerdem ist die Differentialgleichung der geodätischen Linien für Rotationsflächen

$$p \frac{d^2v}{du^2} + 2p' \frac{dv}{du} + p^2 p' \left(\frac{dv}{du}\right)^3 = 0.$$

(Scheffers: Anwendung der Differential- und Integralrechnung auf Geometrie II. S. 412.)

Digitized by Google

Also ist nach IV:

$$T = \Theta(u) \sin v + \varphi + \psi$$

und

$$N = (u_2 \Theta' - U_2) \cos v - \int u_1 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{\partial \psi}{\partial v} \right) du$$

(die Konstante C nehmen wir in φ oder ψ hinein);

für Funktionen komplexer Variabeln besteht aber der Satz:

$$\frac{\partial \varphi(w + i v)}{\partial w} = -i \frac{\partial \varphi(w + i v)}{\partial v}; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial v} = i \frac{\partial \varphi}{\partial w}$$

$$\frac{\partial \psi(w - i v)}{\partial w} = i \frac{\partial \psi(w - i v)}{\partial v}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial v} = -i \frac{\partial \psi}{\partial w}$$

Da ferner

$$dw = \sqrt{-\frac{u_1}{u_2}}\, du$$

in unserem Falle gleich $dw = a u_1 du$ wird, verwandelt sich

$$N = (u_2 \Theta' - U_2) \cos v - \int \frac{dw}{a} i \left(\frac{\partial \varphi}{\partial w} - \frac{\partial \psi}{\partial w} \right) \text{ in}$$

$$N = (u_2 \Theta' - U_2) \cos v - \frac{i}{a} (\varphi(w + i v) - \psi(w - i v))$$

Folglich erhalten wir bei Rotationsflächen 2. Grades die Lösungen des Tangentialsystems:

$$t' = \frac{\Theta \sin v + \varphi(w + i v) + \psi(w - i v)}{p^2}$$

Va.
$$n_2' = \frac{\left(u_2 \frac{d\Theta}{du} - U_2 \right) \cos v - \frac{i}{a} (\varphi(w + i v) - \psi(w + i v))}{p q'}$$

$$n_1' = \frac{p p''}{q'^2} n_2' = \frac{p''}{q'^3} \left[\left(u_2 \frac{d\Theta}{du} - U_2 \right) \cos v - \frac{i}{a} (\varphi - \psi) \right]$$

Setzen wir hierin

$$\frac{dv}{du} = \pm a i \frac{q'}{p^2}$$

und das daraus abgeleitete:

$$\frac{d^2 v}{du^2} = \pm a i \frac{p^2 q'' - 2 q' p p'}{p^4}$$

ein, so überzeugen wir uns leicht, daß die Differentialgleichung der Asymptotenlinien übergeht in die Voraussetzung: $\frac{p^3 p''}{q'^4} = -a^2$; d. h. die Asymptotenlinien sind geodätische Kurven; daher sind sie gradlinig, eine Eigenschaft, welche nur den Flächen 2. Grades zukommt.

Digitized by Google

Die tatsächlichen Spannungen sind für diesen Fall:

$$t = t' = \frac{1}{p^2}\,(\Theta \sin v + \varphi + \Psi)$$

$$n_2 = n_2' + \frac{\Phi}{2} R_1 = n_2' + \frac{k\,p + \mu\,q'}{2} \cdot \frac{-\,q'}{p''} \cos v$$

V.
$$n_2 = \left(\frac{u_2 \frac{d\Theta}{du} - U_2}{p\,q'} - \frac{k\,p + \mu\,q'}{2} \frac{q'}{p''} \right) \cos v - \frac{i}{a} \frac{\varphi - \Psi}{p\,q'}$$

$$n_1 = n_1' + \frac{\Phi}{2} R_2 = n_1' + \frac{k\,p + \mu\,q'}{2} \frac{p}{q'} \cos v$$

$$n_1 = \left[\frac{p''}{q'^2} \left(u_2 \frac{d\Theta}{du} - U_2 \right) + \frac{k\,p + \mu\,q'}{2} \frac{p}{q'} \right] \cos v - \frac{i}{a} \frac{p''}{q'^2} (\varphi - \Psi).$$

Außer den beiden Funktionen $\varphi\,(w + i\,v)$ und $\psi\,(w - i\,v)$ ist hierin nur noch $\Theta\,(u)$ unbekannt; dafür wird aber im folgenden ein Wert gefunden, ohne daß Gleichung III gelöst werden muß.

§ 5.

Die Formeln V verwenden wir nun dazu, die Spannungen in der Hülle eines Rotationsellipsoids zu untersuchen, wenn als äußere Kräfte das Gewicht μ pro Flächeneinheit und ein mit der Höhe proportional zunehmender Innendruck wirken. Am horizontalen Meridian sei der Innendruck $= \Phi_0$ kg/m^2.

Die Funktionen φ und ψ bestimmen sich hier sehr einfach. Damit nirgends auf der Fläche unendlich große Spannungen auftreten, müssen die Funktionen $\varphi\,(w + i\,v)$ und $\psi\,(w - i\,v)$ in der ganzen Ebene w v, auf die sich das Ellipsoid abbilden läßt, endlich und stetig sein. Nach einem Satz über die Funktionen komplexer Veränderlicher kann eine solche Funktion nur eine Konstante sein, die aber notwendig den Wert Null hat, weil sonst an den Polen (für $p = 0$) unendlich große Spannungen aufträten; daraus folgt das φ und ψ identisch Null sind.

Aus den Gleichungen V des § 4 folgt nun, daß die Spannungen in der Form erscheinen:

1)
$$\begin{aligned} t &= -\tau\,(u) \sin v \\ n_2 &= -\nu_2\,(u) \cos v \\ n_1 &= -\nu_1\,(u) \cos v. \end{aligned}$$

In τ, ν_1, ν_2 tritt noch die unbekannte Funktion $\Theta\,(u)$ auf; anstatt sie nun durch Auflösen von III zu bestimmen, ermitteln wir $\tau\,(u)$ und $\nu_2\,(u)$ einfach dadurch, daß wir den Rotationskörper nach einem Parallelkreis durchschneiden, an diesem die Spannungen $t = -\tau \sin v$ und $n_2 = -\nu_2 \cos v$ anbringen und fordern, daß diese Spannungen und die äußeren Kräfte den abgeschnittenen Teil des Rotationskörpers im Gleichgewicht halten.

Digitized by Google

I. Projektion der Kräfte auf die X-Achse (Vertikale). Nach den früheren Festsetzungen ist n_2 positiv, wenn es als Druckspannung wirkt; es hat demnach die in Fig. 7 eingezeichnete Richtung. Über den Sinn der Schubspannung gibt Fig. 2 Aufschluß; da ein Element des Schnittkreises als zur Parameterlinie u + du gehörig aufzufassen ist, hat die anzubringende Schubspannung t den Sinn der wachsenden v. Somit ergibt sich die Komponente der Spannungen in Richtung der positiven X-Achse:

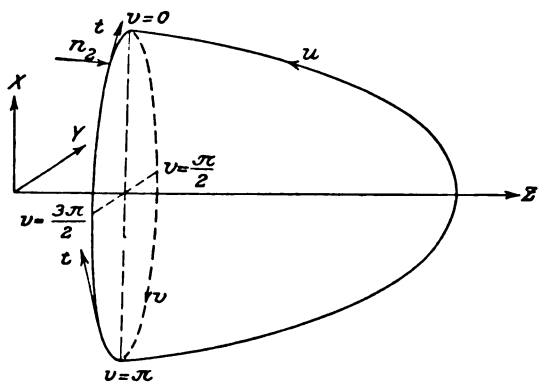


Fig. 7.

$$\int_{v=0}^{2\pi} n_2 \cdot ds_v \cdot - \alpha_1 + \int_0^{2\pi} t\, ds_v \cdot \alpha_2$$

$$= \int_0^{2\pi} - \nu_2 \cos v\, p\, dv \cdot - p' \cos v + \int_0^{2\pi} - \tau \sin v \cdot p\, dv \cdot - \sin v$$

$$= \nu_2 p p' \int_0^{2\pi} \cos^2 v\, dv + \tau p \int_0^{2\pi} \sin^2 v\, dv$$

$$= \nu_2\, p\, p'\, \pi + \tau\, p \cdot \pi.$$

Die der X-Achse entgegengesetzt gerichtete Kraft μ ergibt die Komponente:

$$-\mu \iint dF = -\mu \int_0^u 2\, p\, \pi\, du = -\mu\, O.$$

Der Innendruck kp cos v hat die X-Komponente:

$$\int_{u=0}^{u} \int_0^{2\pi} k\, p \cos v\, dF\, \alpha_3 = \int_0^u \int_0^{2\pi} k\, p \cos v\, p\, du\, dv \cdot - q' \cos v$$

$$= k \int_0^u - p^2 \pi\, q'\, du = k \int_{z=b}^{z} p^2 \pi\, dz = k\, V.$$

(O und V stellen Oberfläche bzw. Volumen des abgeschnittenen Teiles dar.)

Demnach erhalten wir als erste Gleichung:

$$2) \qquad (\nu^2 p' + \tau)\, p\, \pi = \mu\, O - k\, V.$$

Eine zweite Gleichung ergibt sich, wenn wir den Momentensatz auf eine Achse anwenden, welche || der Y-Achse durch den Mittelpunkt des betrachteten Parallelkreises geht. Die Spannung t hat um diese Achse kein Moment; ebenso die parallel zur X-Achse gerichtete Komponente von n_2. Nennen wir die Drehung positiv, wenn die positive Z-Achse in die positive X-Achse übergeführt wird, dann liefert die Z-Komponente der Spannung n_2 das Moment:

$$-\int_0^{2\pi} n_2 \cdot p \cdot dv \cdot (-\gamma_1)\, p \cos v$$

$$= -\int_0^{2\pi} - \nu_2 \cos v\, p\, dv \cdot - q'\, p \cos v = -\nu_2\, p^2\, q'\, \pi.$$

Digitized by Google

Das Hüllengewicht μ liefert das Moment:

$$-\iint \mu \, dF \, (z - z_0) = -\mu \int_{u=0}^{u=u_0} 2 \, p \, \pi \, du \, (q - q_0) = -\mu \, M_O.$$

Die Normalkraft $k \, p \cos v \, dF$ zerlegen wir in eine Komponente $\parallel$ zur X- und eine Komponente $\parallel$ zur Y-Achse; die Y-Komponenten heben sich wegen Symmetrie zum vertikalen Meridian auf. Nun ist die X-Komponente

$$= k \, p \cos v \, p \, du \, dv \, \alpha_3$$

und ihr Moment:

$$\int_{u=0}^{u=u_0} \int_{0}^{2\pi} k \, p \cos v \, p \, du \, dv \cdot -q' \cos v \, (q - q_0)$$

$$= -\int_{0}^{u^*} k \, p^2 \, q' \, \pi \, (q - q_0) \, du = k \int_{z=b}^{z=z_0} d \, V \, (q - q_0) = k \, M_V.$$

Die Z-Komponente: $k \, p \cos v \, p \, du \, dv \, \gamma_3$ liefert den Beitrag:

$$-\int_{0}^{u_0} \int_{0}^{2\pi} k \, p \cos v \, p \, du \, dv \, p' \cdot p \cos v$$

$$= -k \, \pi \int_{0}^{u_0} p^3 \, p' \, du = -k \, \pi \, \frac{p^4}{4}.$$

Der Momentensatz liefert also die Gleichung:

3) $$-\nu_2 \, p^2 \, q' \, \pi - \mu \, M_O + k \, M_V - k \, \pi \, \frac{p^4}{4} = 0.$$

Aus 2) und 3) berechnen sich damit:

IV $$\nu_2 = \frac{k \, M_V - k \, \pi \, \frac{p_4}{4} - \mu \, M_O}{p^2 \, q' \, \pi}$$

$$\tau = \frac{1}{p^2 \, q' \, \pi} \left(p \, q' \, (\mu \, O - k \, V) - p' \, (k \, M_V - k \, \pi \, \frac{p^4}{4} - \mu \, M_O) \right)$$

Hierin bedeuten O, V, M_O und M_V die Integrale:

$$\text{Oberfläche } O = \int_{0}^{u} 2 \, p \, \pi \, du$$

$$\text{Volumen } V = -\int_{0}^{u} p^2 \, \pi \, q' \, du$$

$$\text{Moment der Oberfläche: } M_O \int_{0}^{u_0} 2 \, p \, du \, \pi \, (q - q_0)$$

$$\text{Moment des Volumens: } M_V = -\int_{0}^{u_0} p^2 \, \pi \, q' \, du \, (q - q_0)$$

In M_o und M_v ist nach der Integration wieder u für u_0 zu setzen.

Digitized by Google

Mit dem Ausdruck für τ ist zugleich die partikuläre Lösung Θ (u) der Differentialgleichung III gewonnen. Denn es ist ja $T = \Theta(u) \sin v = -p^2 t = p^2 \tau \sin v$. Also:

$$\text{VII} \quad \Theta(u) = p^2 \tau = \frac{1}{q' \pi}\left(p q' (\mu O - k V) - p' \left(k M_V - k \frac{p^4}{4} \pi - \mu M_O\right)\right).$$

Durch Einsetzen dieses Wertes von Θ (u) in die Gleichung III überzeugt man sich, daß diese erfüllt wird. Diese Gleichung besteht aber für alle Rotationsflächen; daher gilt dieser Wert von Θ (u) nicht nur für Rotationsflächen 2. Grades, sondern er gibt auch die partikuläre Lösung des Tangentialsystems für alle Rotationsflächen; der Wert von Θ (u) in den Gleichungen IV ist also jetzt bekannt, so daß auch im allgemeinen Falle nur mehr die Gleichungen der infinitesimalen Verbiegung zu lösen sind.

Doch kehren wir wieder zu unserm Rotationsellipsoid zurück. Die Spannungen sind also dort:

$$t = \frac{\sin v}{p^2 q' \pi}\left(p' \left(k M_V - k \pi \frac{p^4}{4} - \mu M_O\right) - p q' (\mu O - k V)\right)$$

$$\text{VIII} \quad n_2 = \frac{\mu M_O + k \pi \frac{p^4}{4} - k M_V}{p^2 q' \pi} \cdot \cos v$$

$$n_1 = R_2\left(\Phi - \frac{n_2}{R_1}\right) = \frac{p}{q^1}\left[(k p + \mu q') + \frac{\mu M_O + k \pi \frac{p^4}{4} - k M_V}{p_2 q'^2 \pi} p''\right] \cos v$$

Diese Spannungen sind Zusatzspannungen zu den vom konstanten Innendruck hervorgerufenen Spannungen (§ 1, Gl. 1 und 2). Wir erkennnen daraus, daß die zusätzlichen Ring- und Meridianspannungen am horizontalen Meridian

$$\left(v = \frac{\pi}{2}, \qquad v = \frac{3\pi}{2}\right)$$

Null sind, auf der oberen Hälfte des Rotationsellipsoids anderes Zeichen haben wie auf der untern. Die Schubspannung ist Null am vertikalen Meridian und wechselt bei $v = \pi$ und $v = 2\pi$ das Zeichen, d. h. die Richtung, was aus Symmetriegründen notwendig ist. Das Maximum der Schubspannung ist auf jedem Parallelkreis am horizontalen Meridian, während die normalen Spannungen n_1 und n_2 ihre Höchstwerte am obern, ihre Mindestwerte am untern Teil des vertikalen Meridians erreichen.

Damit die Kräfte das als starr gedachte Ellipsoid im Gleichgewicht halten, ist notwendig, daß

$$4) \qquad k \overline{V} = \mu \overline{O},$$

wo $\overline{O}$ und $\overline{V}$ das ganze Volumen bzw. die ganze Oberfläche des Ellipsoids darstellen. Am Hauptspantquerschnitt nehmen O und V die Werte $\frac{\overline{O}}{2}$ und $\frac{\overline{V}}{2}$ an, es ist also dort

Digitized by Google

$\mu O - k V$ Null; außerdem ist auch $\frac{dx}{du} = p'$ Null, so daß für t aus Gleichung VIII ebenfalls der Wert Null erfolgt. Wir können also sagen:

Der Hauptspantquerschnitt und der vertikale Meridian sind Hauptspannungslinien ($t = 0$).

Zur Ermittlung der Spannungen sind die Werte von O, V, M_O und M_V zu berechnen. Im allgemeinen Falle wird man sie mit dem Integraphen ermitteln, indem man die Funktion unter dem Integralzeichen graphisch aufträgt. Im Falle des Rotationsellipsoids führen jedoch die Integrale auf bekannte Funktionen, so daß ihr Wert auch rechnerisch bestimmt werden kann. Ist nämlich die Ellipse dargestellt durch:

5)
$$\begin{aligned} x &= a \sin \varphi = p \\ z &= b \cos \varphi = q \end{aligned}$$

so hängt die Bogenlänge u mit φ durch die Gleichung zusammen:

$$du = + \sqrt{dx^2 + dz^2} = + a\, d\varphi \sqrt{1 + \frac{b^2 - a^2}{a^2} \sin^2 \varphi} = a \Delta\varphi \cdot d\varphi.$$

Dann wird:

6)
$$\begin{aligned} p' &= \frac{\cos \varphi}{\Delta \varphi} & p'' &= -\frac{b^2}{a^3} \frac{\sin \varphi}{\Delta^4 \varphi} \\ q' &= -\frac{b \sin \varphi}{a \Delta \varphi} & q'' &= -\frac{b}{a^2} \frac{\cos \varphi}{\Delta^4 \varphi}. \end{aligned}$$

Wird zur Abkürzung

$$\beta^2 = \frac{b^2 - a^2}{a^2}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} + \frac{1 + \beta^2}{2 \beta} \operatorname{arc\,tg} \beta$$

gesetzt, dann werden die Integrale:

7)
$$\begin{aligned} O &= 2 a^2 \pi \left(\varepsilon - \frac{\cos \varphi \Delta \varphi}{2} - \frac{1 + \beta^2}{2 \beta} \operatorname{arc\,sin} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1 + \beta^2}} \cos \varphi \right) \right) \\ V &= \frac{a^2 b \pi}{3} (2 - 3 \cos \varphi + \cos^3 \varphi) \\ M_O &= 2 a^2 b \pi \left(-\frac{1}{3 \beta^2} - \varepsilon \cos \varphi + \frac{\Delta \varphi}{3 \beta^2} \left(1 + \beta^2 + \frac{\beta^2}{2} \cos^2 \varphi \right) + \frac{1 + \beta^2}{2 \beta} \cos \varphi \cdot \right. \\ &\qquad \left. \cdot \operatorname{arc\,sin} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1 + \beta^2}} \cos \varphi \right) \right) \\ M_V - \frac{p^4}{4} \pi &= \frac{a^4 \pi}{6} \left[\frac{3 \beta^2}{2} - 4 (1 + \beta^2) \cos \varphi + (6 + 3 \beta^2) \cos^2 \varphi - \right. \\ &\qquad \left. - \left(\frac{\beta^2}{2} + 2 \right) \cos^4 \varphi \right] \end{aligned}$$

Die Zahlenberechnung führen wir nun durch für eine Hülle von der Form eines verlängerten Rotationsellipsoids mit den Achsen b (Rotationsachse) = 1 m,

Digitized by Google

$a = {}^1/_3\,m$; als äußere Kräfte wirkt der mit der Höhe nach dem Gesetz $\Phi_0 + k \cdot h$ zunehmende Innendruck, der am horizontalen Meridian den Wert $\Phi_0 = 5\,kg/m^2$ hat; unter Annahme von Wasserstoffüllung setzen wir für $k = 1{,}1\,kg/m^3$. Außerdem wirkt noch ein konstantes Hüllengewicht $\mu\,kg/m^2$; der Wert von μ ist bestimmt durch die Forderung

$$k\,\bar{V} - \mu\,\bar{O} = 0 \text{ zu}$$

$$\mu = k\,\frac{\bar{V}}{\bar{O}} = \frac{k \cdot \frac{4}{3}\,a^2\,b\,\pi}{4\,a^2\,\pi\,\varepsilon} = \frac{b\,k}{3\,\varepsilon} = 0{,}15\,\frac{kg}{m^2},$$

ein Wert, der etwa für Papierhüllen zutrifft.

Der konstante Innendruck erzeugt die Spannungen $\frac{\Phi_0\,R_2}{2}$ und $\frac{\Phi_0\,R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$, welche in Fig. IV durch ausgezogene Kurven dargestellt sind. Um τ und ν_2 zu erhalten, wurden für $\varphi = 0^0, 5^0, 10^0 \ldots 90^0$ die Werte von O, V, M_O, M_V berechnet und in die Formeln VI eingesetzt. So ergaben sich die in Tabelle II wiedergegebenen Werte für τ, ν_2. Da für $v = 0$ $n_1 = -\nu_1$, $n_2 = -\nu_2$ wird, erkennen wir, daß die von k und μ verursachten normalen Spannungen im obern Teil des Ellipsoids Zugspannungen, im untern Teil Druckspannungen sind; jedoch ist die Ringspannung innerhalb einer den Pol umschließenden Kalotte in der obern Hälfte Druckspannung, in der untern Zugpannung, während sie innerhalb des größten Teils des Ellipsoids dasselbe Verhalten wie die Meridianspannung zeigt. Wir können also sagen, daß die vom konstanten Innendruck erzeugten Zugspannungen in der obern Hälfte vergrößert, in der untern verkleinert werden. Die größte auftretende Spannung ist die Ringspannung am höchsten Punkt im Betrag von $-1637\,g/m$; der konstante Innendruck $\Phi_0 = 5\,kg/m^2$ hätte nur ein Maximum von $-1573\,g/m$ ergeben, so daß die prozentuale Vergrößerung $\sim 4\,\%$ beträgt. Die kleinste normale Spannung wird dargestellt durch die einander gleiche Ring- und Meridianspannung an den Polen im Betrag von $-278\,g/m$. Die Schubspannungen sind verhältnismäßig klein, erreichen sie doch nur ein Maximum von $18\,g/m$ für $\varphi = 50^0$ am horizontalen Meridian, ungefähr in der Mitte zwischen Äquator und Pol. Die Spannungsverhältnisse für die übrigen Meridiane liegen innerhalb der extremen Verhältnisse, die sich am obern und untern Teil des vertikalen Meridians einstellen; ein Bild über Größe und Richtung der von k und μ erzeugten Spannungen gibt auch die Figur 8, welche die Spannungen enthält, die am Parallelkreis $\varphi = 50^0$ und am horizontalen Meridian anzubringen wären, wenn nach diesen Kurven durchschnitten würde.

Der größte Parallelkreis und der vertikale Meridian sind Hauptspannungslinien; im übrigen sind die Winkel α_1 und α_2, den die Hauptspannungslinien mit dem Meridian bilden, durch die Gleichung gegeben:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\,t}{n_1 - n_2} = \frac{-2\,\tau \sin v}{(n_1)_{\varphi_0} - (n_2)_{\varphi_0} - (\nu_1 - \nu_2)\cos v}.$$

Tabelle II enthält die Werte von α längs des horizontalen Meridians; das Maximum von α liegt nahe dem Pol und beträgt $\sim 3{,}7^0$. Da die Differenz $\nu_1 - \nu_2$

Digitized by Google

klein ist gegen $(n_1 - n_2)_{\varphi_0}$, können wir angenähert

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{-2\tau}{(n_1 - n_2)_{\varphi_0}} \sin v = (\operatorname{tg} 2\alpha)_{v=\frac{\pi}{2}} \cdot \sin v$$

setzen und ersehen aus dieser Form, daß für andere Meridiane die Hauptspannungslinien sich noch näher den Krümmungslinien anschließen. An den Polen ist $t = 0$, $n_1 = n_2$; dort ist die Spannungsindikatrix ein Kreis; die Pole sind Nabelpunkte im mechanischen Sinne.

Fassen wir dies zusammen, so ergibt sich für den Verlauf der Hauptspannungslinien folgendes ungefähres Bild (Fig. 9).

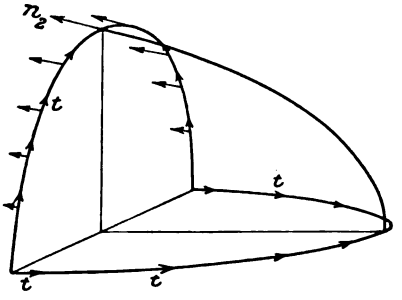


Fig. 8.

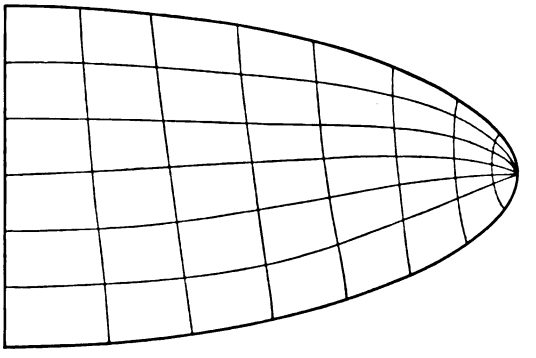


Fig. 9.

Fig. IV zeigt den Meridian des Rotationsellipsoids, den Verlauf der normalen und tangentialen Spannungen für den horizontalen Meridian $v = \frac{\pi}{2}$, $v = \frac{3\pi}{2}$ und für den obern ($v = 0$) und den untern Teil ($v = \pi$) des vertikalen Meridians.

§ 6.

Die Bestimmung der Funktionen $\varphi(w + i v)$, $\psi(w - i v)$ war in diesem Beispiel sehr einfach; haben wir es jedoch nur mit einem Teil eines Rotationsellipsoids zu tun, an dessen Begrenzung noch „Randkräfte" wirken, so sind die Funktionen φ und ψ aus der Bedingung zu ermitteln, daß die Spannungen am Rande gleich den Randkräften werden müssen; letztere müssen notwendigerweise tangential an die Fläche sein.

Es handle sich beispielsweise um die von dem horizontalen Meridian begrenzte obere Hälfte eines Rotationsellipsoids; auf die Hülle wirke ein konstanter Innendruck Φ_0, am Rande eine vertikale Last $= L(u)$ kg pro Längeneinheit. Die Annahme rotatorischer Spannungsverteilung, wie sie in § 1 gemacht wurde, geht hier nicht an; vielmehr liefern die Gleichungen V von § 4 durch Nullsetzen von k und μ die allgemeinen Spannungswerte:

$$t = \frac{1}{p^2}(\varphi(w + i v) + \psi(w - i v))$$

1)
$$n_2 = \Phi_0 \frac{R_2}{2} - \frac{i}{c} \frac{\varphi - \psi}{p q'}$$

$$n_1 = \Phi_0 \frac{R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{i}{c} \frac{p''}{q'^3}(\varphi - \psi).$$

Digitized by Google

Die Bedingung, daß am Rande $n_1 = L(u)$ und $t = 0$ sein muß, liefert für φ und ψ die beiden Gleichungen:

2)
$$\frac{\Phi_0 R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{i}{c}\frac{p''}{q'^3}(\varphi - \psi) = L(u)$$
$$\varphi + \psi = 0.$$

Daraus finden wir die Werte der Funktionen φ und ψ am Rande; der Cauchysche Satz liefert dann die Werte im Innern.

Bei Wahl von $L(u)$ ist dabei die Bedingung zu erfüllen, daß sämtliche Kräfte die als starr gedachte Fläche im Gleichgewicht halten müssen. Das heißt in unserem Fall:

$$\iint_{\text{Innere}} \Phi_0 \, dF \cdot \alpha_3 = \int_{\text{Rand}} L \, du$$

oder
$$\Phi_0 \int_0^1 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} p \, du \, dv \cdot - q' \cos v = 2 \int_0^1 L \, du$$
$$2\Phi_0 \int_0^1 - p \, q' \, du = 2\Phi_0 \int_0^{\lambda} p \, dz = \Phi_0 \cdot M = 2 \int_0^1 L \, du$$

worin M die Fläche eines Achsenschnittes bedeutet; im Falle des Ellipsoids ist $M = a\,b\,\pi$.

Wählen wir in den Gleichungen 2) die Belastung

$$L(u) = \Phi_0 \frac{R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$$

so werden die Randwerte von φ und ψ Null; also sind diese Funktionen im Innern überall Null. Wir erhalten:

$$t = 0 \qquad n_2 = \Phi_0 \frac{R_2}{2} \qquad n_1 = \Phi_0 \frac{R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right),$$

ein Resultat, das ja nach § 1 und gemäß der Definition unserer Spannungen selbstverständlich und für alle Rotationsflächen gültig ist. Daß

$$L(u) = \Phi_0 \frac{R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$$

der Bedingung genügt, ersehen wir aus folgendem:

Nach § 1 ist

$$\Phi_0 \frac{R^2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) = \Phi_0 \frac{df}{du},$$

also

$$2 \int_0^1 L \, du = 2 \int_0^1 \Phi_0 \frac{df}{du} \, du = 2\Phi_0 \int_0^1 df = \Phi_0 \cdot M.$$

Die obere Hälfte eines Rotationskörpers ist also im Gleichgewicht, wenn auf die Hülle ein konstanter Innendruck Φ_0, am horizontalen Meridian die Last

$$L = \frac{\Phi_0}{2} R_2 \left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Digitized by Google

pro Längeneinheit nach abwärts wirkt. Die erzeugten Spannungen sind:

$$t = 0 \qquad n_2 = \Phi_0 \frac{R_2}{2} \qquad n_1 = \Phi_0 \frac{R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right).$$

Die am horizontalen Meridian verteilte Last hat die Summe $\Phi_0 \cdot M$.

In ganz gleicher Weise ist die untere Hälfte eines Rotationskörpers im Gleichgewicht unter Wirkung einer konstanten Normalkraft Φ_1 und einer Randkraft, welche am horizontalen Meridian nach dem Gesetz

$$L_1 = \Phi_1 \frac{R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right),$$

vertikal nach aufwärts wirkt. Setzen wir nun beide Hälften zusammen samt den auf sie wirkenden Kräften, so erhalten wir einen geschlossenen Rotationskörper, an dessen horizontalem Meridian eine Last verteilt ist, welche nach dem Gesetz:

$$L_0 - L_1 = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{2} R_2\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$$

vertikal nach abwärts wirkt, und als Resultante den Betrag $(\Phi_0 - \Phi_1)\,M$ hat; auf die obere Hälfte wirkt ein konstanter Innendruck Φ_0, auf die untere der ebenfalls konstante Normaldruck Φ_1. Die Spannungen sind in der oberen Hälfte:

$$(n_1)_0 = \frac{\Phi_0}{2} R_2\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (n_2)_0 = \frac{\Phi_0}{2} R_2$$

unten

$$(n_1)_u = \frac{\Phi_1}{2} R_2\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (n_2)_u = \frac{\Phi_1}{2} R_2.$$

Die zu hebende äußere Last ist gleich:

$$(\Phi_0 - \Phi_1) \cdot M.$$

Angenähert sind wir so zu einer Lösung des in der Praxis auftretenden Falles gekommen, wo längs eines am Tragkörper angebrachten Gurtes die äußere Last — Gondel samt Inhalt, Takelage — verteilt ist. Eine Abweichung von der Wirklichkeit tritt nur insofern ein, als der Innendruck proportional mit der Höhe wächst, während er bei dem beschriebenen Verfahren in jedem Teil als konstant zu betrachten ist. Wählen wir jedoch die konstanten Drucke Φ_0 oder Φ_1 so, daß $(\Phi_0 - \Phi_1)\,M =$ der zu hebenden Last ist und daß sie die wirklich auftretenden Normaldrucke überall übertreffen, so werden die damit berechneten Spannungen sicher auch größer als die wirklichen ausfallen.

Die eben entwickelte Methode — sie sei im folgenden angenähertes Verfahren genannt — läßt sich auch ausdehnen auf den in der Praxis häufigern Fall, daß die äußere Last längs eines auf der untern Hälfte verlaufenden Traggurtes verteilt ist. Setzt sich dieser Gurt aus Meridianen und Parallelkreisen zusammen, so ist die äußere Last nach dem Gesetze

$$n_1 = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{2} R_2\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Digitized by Google

normal zum Meridian und gemäß

$$n_2 = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{2} R_2$$

normal zum Parallelkreis zu verteilen. Bildet jedoch ein Linienelement der Traggurtkurve mit dem Meridian einen Winkel α, so bestimmen die Gleichungen 1) der Einleitung Normal- und Tangentialkomponente der anzubringenden spezifischen Belastung. Auf den oberhalb des Traggurtes gelegenen Teil der Rotationsfläche wirke der Druck Φ_0, auf den untern Teil Φ_1. Dann fordert die Gleichgewichtsbedingung:

Resultante der Last

$$= \iint\limits_{\text{obern Teil}} \Phi_0 \, dF \, \alpha_3 - \iint\limits_{\text{untern Teil}} \Phi_1 \, dF \, \alpha_3$$

$$= \Phi_0 \iint\limits_{\text{obern Teil}} df_1 - \Phi_1 \iint\limits_{\text{untern Teil}} df_2 = (\Phi_0 - \Phi_1) \cdot M',$$

wo df_1 und df_2 die Projektion des Flächenelements dF auf den horizontalen Meridian bedeuten und M' den Flächeninhalt der von der Projektion des Traggurtes auf den horizontalen Meridian umschlossenen Fläche vorstellt.

Gewinnen wir so eine obere Grenze der vom Innendruck und der Last hervorgerufenen Spannungen, so bleibt noch zu entscheiden, ob das Hüllengewicht und die Zunahme des Innendrucks mit der Höhe eine bedeutende Erhöhung der Spannungen hervorbringen. Dies untersuchen wir nun an einem Rotationsellipsoid, indem wir sämtliche Kräfte in zwei Systeme teilen:

I. Wir nehmen von dem Innendruck k x einen Teil $k_1 \cdot x$ hinweg, so daß dieser Druck und das Hüllengewicht μ kg/m² sich das Gleichgewicht halten; k_1 bestimmt sich folglich aus der Gleichung

$$k_1 \cdot \overline{V} = \mu \, \overline{O}.$$

II. Das zweite System bilde der restierende Innendruck $k_2 \cdot x = (k - k_1) x$ und die am Traggurt verteilte äußere Last; die hierdurch erzeugten Spannungen bestimmen sich aus dem „angenäherten Verfahren".

Für I erhalten wir die Spannungen in den Gleichungen VIII § 5; wir benötigen jedoch nur die maximalen Spannungen, welche wie das dort behandelte Beispiel zeigte, am höchsten Punkt, d. h. für $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $v = 0$ auftreten. Dafür wird:

$$n_2 = \left[\frac{\mu M_0 + k_1 \pi \frac{p^4}{4} - k_1 M_V}{p^2 q' \pi} \right]_{\varphi = \frac{\pi}{2}}$$

Beim Rotationsellipsoid (siehe Gl. 5) und 6) von § 5) ist nun für

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \qquad p^2 = a^2, \qquad q' = 1$$

$$M_O = \frac{2}{3} \pi \frac{a\,b\,(a^2 + a\,b + b^2)}{a + b}$$

$$M_V - \pi \frac{p^4}{4} = \frac{\pi}{4} a^2 (b^2 - a^2).$$

Digitized by Google

n_1 bestimmt sich dazu aus Gleichung:

$$\frac{n_1}{R_2} + \frac{n_2}{R_1} = \Phi,$$

oder

$$\frac{n_1}{-a} + \frac{n_2}{-\frac{b^2}{a}} = k_1 \cdot a - \mu.$$

Ein Beispiel wird diese Verhältnisse noch klarer erscheinen lassen:

Gegeben ein Tragkörper von der Form eines Rotationsellipsoids:

$a = 5$ m, $b = 30$ m, Rotationsachse.

Hüllengewicht $= \mu = 0{,}3$ kg/m².

Auftrieb: $k = 1{,}1$ kg/m³.

Am horiz. Meridian Druck $\Phi_0 = 25$ kg/m².

Die Last soll am horizontalen Meridian verteilt werden.

Volumen $\overline{V} = {}^4/_3\, a^2 b\, \pi = 3142$ m³.

Oberfläche $\overline{O} = 4a^2 \pi \cdot \varepsilon = 1498$ m².

Somit Auftrieb $= k \cdot \overline{V} = 1{,}1 \cdot 3142 = 3456$ kg.

Gewicht der Hülle $= \mu\, \overline{O} = 0{,}3 \cdot 1498 = 449{,}5$ kg.

Also ist die Last, die noch getragen werden kann:

$$k\,\overline{V} - \mu\,\overline{O} = 3456 - 450 = 3006\,\text{kg}.$$

Um die von System I verursachten Spannungen zu finden, bilden wir k_1 aus der Gleichung $k_1\overline{V} - \mu\,\overline{O} = 0$:

$$k_1 = \frac{\mu\,\overline{O}}{\overline{V}} = \frac{0{,}3 \cdot 1498}{3142} = 0{,}143 \text{ kg/m}^3.$$

Die maximale Meridianspannung, die am höchsten Punkte Auftritt, berechnet sich nach Gleichung VIII von § 5 zu:

$$n_2 = \frac{1}{a^2}\left[\frac{2}{3}\mu\frac{a\,b\,(a^2 + a\,b + b^2)}{a + b} - \frac{k_1}{4}a^2(b^2 - a^2)\right]$$

$$= \frac{1}{25}\left[\frac{2}{3}0{,}3\frac{150 \cdot 1075}{35} - \frac{0{,}143}{4}25 \cdot 875\right]$$

$(n_2)_{max} = -5{,}6$ kg/m.

$(n_1)_{max}$ berechnet sich aus:

$$\frac{n_1}{-5} + \frac{n_2}{-\frac{900}{5}} = k_1 a - \mu = 0{,}143 \cdot 5 - 0{,}3 = 0{,}415$$

$$(n_1)_{max} = -5\left(0{,}415 - \frac{5 \cdot 5{,}6}{900}\right) = -1{,}5\,\text{kg/m}.$$

Nach Wegnahme des Druckes $k_1 \cdot x$ bleiben für das System II noch folgende Drucke:

am horizontalen Meridian 25 kg/m²,

Digitized by Google

am höchsten Punkt: $25 + (k - k_1) \cdot 5 = 25 + 1{,}0 \cdot 5 = 30\,kg/m^2$,
am tiefsten Punkt: $25 - (k - k_1) \cdot 5 = 20\,kg/m^2$.

Beim angenäherten Verfahren haben wir Φ_0 und Φ_1 so zu wählen, daß an jeder Stelle in Wirklichkeit ein kleinerer Druck ist; außerdem muß die Gleichung erfüllt sein:

$$(\Phi_0 - \Phi_1) \cdot M = \text{Last}$$
$$(\Phi_0 - \Phi_1) \cdot a\,b\,\pi = k\,V - \mu\,O = k\,V - k_1\,V$$
$$\Phi_0 - \Phi_1 = \frac{3006}{150 \cdot \pi} = 6{,}39\,kg/m^2.$$

Wählen wir nun auf der unteren Hälfte $\Phi_1 = 25\,kg/m^2$, so wird auf der oberen $\Phi_0 = 25 + 6{,}4 = 31{,}4\,kg/m^2$; der wirkliche Innendruck ist also überall kleiner. Hätten wir Φ_0 gleich dem Druck im höchsten Punkt $= 30\,kg/m^2$ angenommen, so wäre $\Phi_1 = 30 - 6{,}4 = 23{,}6\,kg/m^2$ geworden und also kleiner als der am horizontalen Meridian tatsächliche Druck $25\,kg/m^2$ geworden. Diese Annahme würde also unsere Bedingung nicht erfüllen. Die bei System II auftretenden maximalen Spannungen, welche sich auf der oberen Hälfte des Äquators einstellen, berechnen sich zu:

$$(n_2)_{max} = \frac{\Phi_0 R_2}{2} = -\frac{31{,}4}{2} \cdot 5 = -78{,}5\,kg/m,$$

$$(n_1)_{max} = \frac{\Phi_0 R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) = -78{,}5\left(2 - \frac{1}{36}\right) = -154{,}7\,kg/m.$$

Die Verteilung der äußeren Last 3006 kg erfolgt nach dem Gesetze:
Belastung pro Meter des horizontalen Meridians

$$= \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{2} R_2\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right).$$

Diese spezifische Belastung zeigt qualitativ denselben Verlauf wie die Ringspannung für konstanten Innendruck $\left(\text{siehe z. B. Tafel IV die Kurve } n_1 \text{ für } v = \frac{\pi}{2}\right)$; d. h. sie hat ihr Maximum am Äquator, ihr Minimum am Pol; und zwar ist in unserm Falle:

$$L_{max} = -\frac{6{,}39}{2} \cdot 5\left(2 - \frac{1}{36}\right) = 15{,}7\,kg/m,$$

$$L_{min} = -\frac{6{,}39}{2} \cdot \frac{a^2}{b}(2 - 1) = 2{,}7\,kg/m.$$

Fassen wir nun zusammen:

Von System I erzeugte Spannungen: $(n_1)_{max} = -1{,}5$; $(n_2)_{max} = -5{,}6\,kg/m$,
„ „ II „ „ $(n_1)_{max} = -154{,}7$; $(n_2)_{max} = -78{,}5\,kg/m$.

Diese maximalen Spannungen treten sämtlich im höchsten Punkt auf; rechnen wir dazu die von Strömungsdruck und Reibung ungefähr an derselben Stelle erzeugten Maximalspannungen, die sich in Tabelle I allerdings für einen andern Tragkörper berechnet vorfinden, so ergibt sich eine Erhöhung von $-13\,kg/m$

Digitized by Google

bzw. — 3 kg/m für Ring- bzw. Meridianspannung. Insgesamt ergeben sich sonach folgende die tatsächlichen maximalen Werte übertreffenden Spannungen:

$$(n_1)_{max} = -1{,}5 - 154{,}7 - 13 = -169{,}2 \text{ kg/m},$$
$$(n_2)_{max} = -5{,}6 - 78{,}5 - 3 = -87{,}1 \text{ kg/m}.$$

Da hierzu die Spannungen des Systems I den geringsten Beitrag liefern, können wir folgende für jeden Tragkörper geltende praktische Regel aufstellen:

Man erhält eine obere Grenze der Spannungen, wenn man die aus System II erhaltenen Maximalwerte um 10 % vergrößert. Zu diesen Maximalwerten aber kommt man durch Annahme eines konstanten Druckes Φ_0 für den oberhalb des Traggurtes gelegenen Teil und eines Druckes Φ_1 für den untern Teil, so zwar, daß Φ_0 und Φ_1 den größten in ihrem Gebiet wirklich auftretenden Innendruck noch übertreffen. Ferner müssen Φ_0 und Φ_1 der Bedingung genügen: $(\Phi_0 - \Phi_1) M' =$ Gesamtlast, wo M' gleich dem Flächeninhalt der von der Projektion der Traggurtkurve auf den horizontalen Meridian umschlossenen Fläche ist. Die maximalen Spannungen sind dann:

$$(n_1)_{max} = \frac{\Phi_0}{2} R_2 \left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right)$$
$$(n_2)_{max} = \frac{\Phi_0}{2} R_2,$$

die Last ist nach dem Gesetz zu verteilen:

$$L(u) = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{2} R_2 \left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right),$$

wo R_2 und R_1 die Hauptkrümmungsradien im höchsten Punkte sind. Da $\frac{R_2}{R_1}$ für die gebräuchlichen Tragkörperformen sehr klein ist, erhalten wir in $(n_1)_{max} = \Phi_0 \cdot R_2$ einen angenäherten, etwas größern Wert. R_2 ist der Radius des Hauptspantquerschnittes in diesem Fall.

Eine gewisse Garantie dafür, daß die so berechneten Spannungen die wirklich auftretenden übertreffen, erhalten wir bei exakter Berechnung der Spannungen für Kugel und Zylinder. Bei der Kugel zeigen die Kräfte: Innendruck $\Phi + k x$, Hüllengewicht μ und äußere Last Rotationssymmetrie um den vertikalen Kugeldurchmesser; beim Zylinder, dessen Grund- und Deckkreis fehlen oder sehr klein gegen die Länge sind, ist die Spannung auf einer Mantellinie konstant.

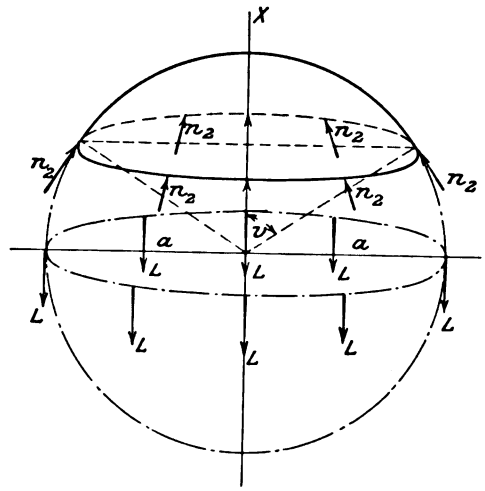


Fig. 10.

Unter Beibehaltung des früheren Koordinatensystems bezeichne nun n_2 die normale Spannung eines horizontalen Parallelkreises einer Kugel mit Radius a.

Digitized by Google

Die äußere Last

$$2\,a\,\pi \cdot L = k\,\frac{4}{3}\,a^3\,\pi - 4\,\mu\,a^2\,\pi$$

ist am horizontalen größten Kreis gleichmäßig verteilt. Dann gibt der Projektionssatz in bezug auf die X-Achse

$$n_2 \cdot 2\,a \sin v \cdot \pi \cdot \sin v + \iint \Phi\,dF \cos v + \iint k\,a \cos v\,dF \cos v - \iint \mu\,dF = 0$$

$$2\,a\,\pi \cdot n_2 \cdot \sin^2 v + \Phi \int_0^v \underbrace{a\,dv \cdot 2\,a \sin v\,\pi}_{dF} \cdot \cos v + k\,a \int_0^v a\,dv\,2\,a \sin v\,\pi \cos^2 v$$
$$- \mu \cdot 2\,a\,\pi\,(a - a \cos v).$$

Daraus findet sich:

$$(n_2)_{oben} = -\left[\Phi\,\frac{a}{2} + \frac{1}{a \sin^2 v}\left(\frac{k\,a^3}{3}(1 - \cos^3 v) - \mu\,a^2\,(1 - \cos v)\right)\right]$$

oder:

$$(n_2)_{oben} = -\frac{\Phi\,a}{2} - \frac{a}{a + x}\left[\frac{k}{3}\,(a^2 + a\,x + x^2) - \mu\,a\right].$$

Hätten wir die andere von demselben Parallelkreis abgeschnittene Kalotte ins Gleichgewicht gesetzt, dann wäre als Kraft noch die äußere Last hinzugetreten; vermöge der Gleichung $2\,a\,\pi \cdot L = k\,V - \mu\,O$ wäre aber dann derselbe Wert für $(n_2)_o$ erhalten worden.

In ganz gleicher Weise findet man:

$$(n_2)_{unten} = -\frac{\Phi\,a}{2} + \frac{a}{a - x}\left[\frac{k}{3}\,(a^2 - a\,x + x^2) - \mu\,a\right].$$

Am horizontalen größten Kreis $x = 0$ bildet sich somit der Spannungssprung:

$$(n_2)_u - (n_2)_o = 2\,\frac{k\,a^2}{3} - 2\,\mu\,a,$$

dieses ist aber gleich der in diesem Falle konstanten spezifischen Belastung L gemäß Gleichung:

$$2\,a\,\pi \cdot L = \frac{4}{3}\,a^3\,k\,\pi - 4\,a^2\,\pi\,\mu.$$

Zu beiden n_2 berechnet sich n_1 aus Gleichung:

$$\frac{n_1}{R_2} + \frac{n_2}{R_1} = \Phi, \text{ oder } \frac{n_1}{-a} + \frac{n_2}{-a} = \Phi + k\,a \cos v - \mu \cos v.$$

Es wird

$$(n_1)_o = -\frac{\Phi\,a}{2} - \frac{1}{a + x}\left[\frac{k\,a}{3}\,(2\,x^2 + 2\,a\,x - a^2) + \mu\,(a^2 - a\,x - x^2)\right]$$

$$(n_1)_u = -\frac{\Phi\,a}{2} - \frac{1}{a - x}\left[\frac{k\,a}{3}\,(a^2 + 2\,a\,x - 2\,x^2) - \mu\,(a^2 + a\,x - x^2)\right]$$

n_1 und n_2 erreichen ihr Maximum am höchsten Punkt, $x = a$;

$$(n_1)_{max} = (n_2)_{max} = -\frac{\Phi\,a}{2} - \frac{k\,a^2 - a\,\mu}{2}$$

Digitized by Google

Ist nun $\Phi = 25\,kg/m^2$ angenommen, $a = 5\,m$, für k, μ ihre früheren Werte $1{,}1\,kg/m^3$ und $\mu = 0{,}3\,kg/m^2$, dann wird der exakte Wert der größten Spannung:

$$(n_1)_{max} = (n_2)_{max} = -\frac{25 \cdot 5}{2} - \frac{1{,}1 \cdot 25 - 0{,}3 \cdot 5}{2} = -75{,}5\,kg/m\,.$$

Welche Maximalspannung ergibt nun das Näherungsverfahren? Es ist Φ_0 und Φ_1 so zu wählen, daß

$$(\Phi_0 - \Phi_1) \cdot M = \text{Last} = 2\,a\,\pi\,L$$

$$(\Phi_0 - \Phi_1)\,a^2\pi = k\frac{4}{3}a^3\pi - \mu\,4\,a^2\pi$$

$$\Phi_0 - \Phi_1 = k\frac{4\,a}{3} - 4\,\mu = 6{,}1\,kg/m^2.$$

Der wirkliche Druck ist

am horizontalen Großkreis: $25\,kg/m^2$,
am höchsten Punkt: $25 + 1{,}1 \cdot 5 = 30{,}5\,kg/m^2$.

Wählen wir also $\Phi_1 = 25\,kg/m^2$, so ist der Druck im (höchsten Punkt) obern Teil $\Phi_0 = 25 + 6{,}1 = 31{,}1\,kg/m^2$, so daß nun überall der Druck größer ist als in Wirklichkeit. Nach dem Näherungsverfahren ist dann die Maximalspannung:

$$(n_1)_{max} = \frac{\Phi_0 R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{\Phi_1 R_2}{2}\,(n_2)_{max} = -\frac{31{,}1 \cdot 5}{2} = -\frac{155{,}5}{2}$$
$$= -77{,}5\,kg/m$$

und daher größer als die tatsächliche, welche nur $-75{,}5\,kg/m$ beträgt.

Um das Verfahren auch noch im Falle des Zylinders zu prüfen, stelle der Kreis mit Radius a in Fig. 11 den Querschnitt des Zylinders mit der Länge l vor; längs der horizontalen diametralen Mantellinien wirke die Last $Q = 2\,l \cdot L = k\,V - \mu\,O = k\,a^2\,\pi\,l - 2\,a\,\pi\,\mu\,l$ gleichmäßig.

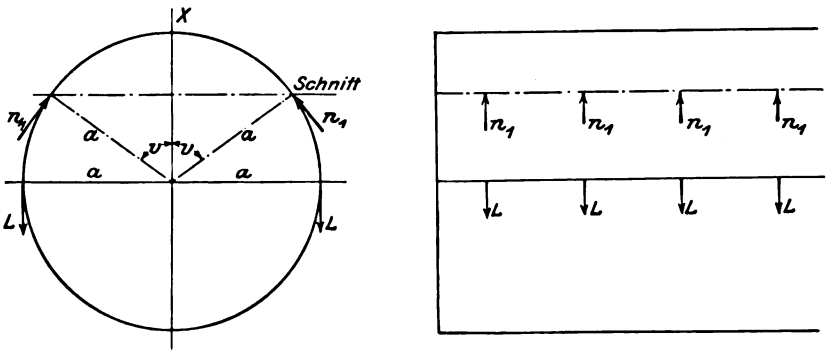


Fig. 11.

Schneiden wir mit einer horizontalen Ebene ein Stück des Zylinders ab, bringen an den Schnittmantellinien die konstante Spannung n_1 an und setzen dann das Stück ins Gleichgewicht, so liefert der Projektionssatz in bezug auf die Vertikale die Gleichung:

Digitized by Google

$$-2l(n_1)_{oben}\cdot\sin v = 2\int_0^{l}\int_0^{v}(\Phi + k\,x)\,dF\cos v - 2\int_0^{l}\int_0^{v_0}\mu\,dF$$

$$= 2\,a\,l\int_0^{v}(\Phi + k\,a\cos v)\,dv\cos v - 2\,a\,l\,\mu\,v.$$

$$= 2\,a\,l\left(\Phi\sin v + k\,a\left(\frac{v}{2} + \frac{\sin 2v}{4}\right)\right) - 2\,a\,l\,\mu\,v.$$

Daraus:

$$(n_1)_{oben} = -\Phi\,a - \frac{k\,a^2}{2}\left(\frac{v}{\sin v} + \cos v\right) + \mu\,a\,\frac{v}{\sin v}$$

oder

$$(n_1)_{oben} = -\Phi\,a - \frac{L}{\pi}\,\frac{v}{\sin v} - \frac{k\,a^2}{2}\cos v.$$

Dasselbe hätte der Projektionssatz ergeben, wenn die untere abgeschnittene Kalotte ins Gleichgewicht gesetzt worden wäre. Machen wir den Schnitt in der untern Zylinderhälfte, so finden wir:

$$(n_1)_{unten} = -\Phi\,a + \frac{L}{\pi}\,\frac{\pi - v}{\sin v} - \frac{k\,a^2}{2}\cos v.$$

Aus beiden Werten für n_1 ist ersichtlich, daß die Spannung am horizontalen Meridian den Sprung L erleidet.

Die Spannung n_2 senkrecht zum Parallelkreis wirkend hat den Wert Null, weil keine Kraft eine Komponente in Richtung der Rotationsachse hat. Dabei ist vorausgesetzt, das Grund- und Deckkreis des Zylinders fehlen; sind diese vorhanden, so hat die Meridianspannung in erster Annäherung den konstanten Wert $\frac{\Phi\cdot a}{2}$.

Die Spannungen erreichen ihr Maximum längs der höchsten Mantellinie, $v = 0$;

$$(n_1)_{max} = -\Phi\cdot a - \frac{L}{\pi}\left(\frac{v}{\sin v}\right)_0 - \frac{k\,a^2}{2}\cos 0 = -\left(\Phi\,a + \frac{L}{\pi} + \frac{k\,a^2}{2}\right);$$

wählen wir dieselben Zahlen wie bei der Kugel, also $\Phi = 25\ kg/m^2$, $a = 5\ m$, dann ist

$$\frac{L}{\pi} = \frac{k\,a^2}{2} - a\,\mu = \frac{1{,}1\cdot 25}{2} - 5\cdot 0{,}3 = 12{,}25;$$

so ergibt sich

$$n_1 = -\left(25\cdot 5 + 12{,}25 + \frac{1{,}1\cdot 25}{2}\right) = -151{,}0\ kg/m$$

als der exakte Wert. Andererseits gibt das angenäherte Verfahren:

$$(\Phi_0 - \Phi_1)\,M = \text{Gesamtlast} = 2\,l\,L$$

$$(\Phi_0 - \Phi_1)\,2\,a\cdot l = 2\,l\,L$$

$$\Phi_0 - \Phi_1 = \frac{L}{a} = \frac{12{,}25\cdot\pi}{5} = 7{,}7\ kg/m^2.$$

Digitized by Google

Die wirklichen Innendrucke sind:

am tiefsten Punkt $= 25 - 1{,}1 \cdot 5 = 19{,}5\,\mathrm{kg/m^2}$,
in der Mitte der Höhe $= 25\,\mathrm{kg/m^2}$,
am höchsten Punkt $25 + 1{,}1 \cdot 5 = 30{,}5\,\mathrm{kg/m^2}$.

Wählen wir $\Phi_1 = 25\,\mathrm{kg/m^2}$, dann ist $\Phi_0 = 25 + 7{,}7 = 32{,}7\,\mathrm{kg/m^2}$; die Drucke sind dann sowohl oberhalb als unterhalb des Traggurtes größer als die wirklichen. Die maximale Spannung ist nach dem Näherungsverfahren:

$$n_1 = \Phi_0 \frac{R_2}{2}\left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{\Phi_0 R_2}{2} \cdot 2 = -\Phi_0 \cdot a = -32{,}7 \cdot 5$$

$$(n_1)_{max} = -163{,}5\,\mathrm{kg/m},$$

während die genaue Rechnung — 151,0 kg/m ergab.

Für Kugel und Zylinder liefert also das angenäherte Verfahren größere Spannungswerte als die exakte Berechnung. Dies gibt eine Bestätigung der auf Seite 63 aufgestellten Regel, da die Tragkörperformen eine Mittelstellung zwischen der Zylinder- und Kugelform einnehmen.

Digitized by Google

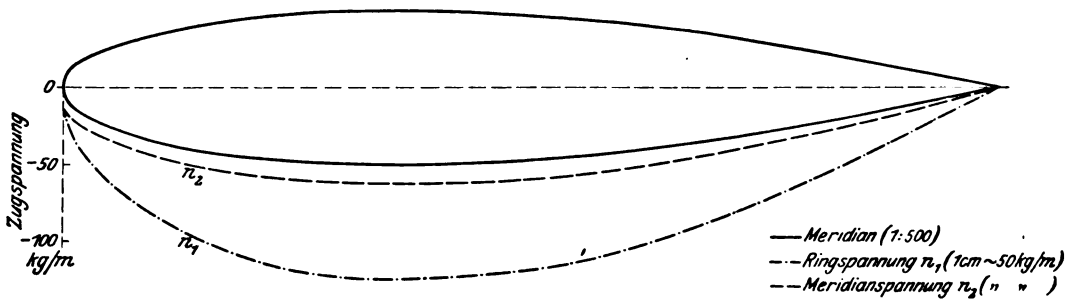


Fig. I. Spannungsverteilung bei konstantem Innendruck $\Phi_0 = 25$ kg/m².

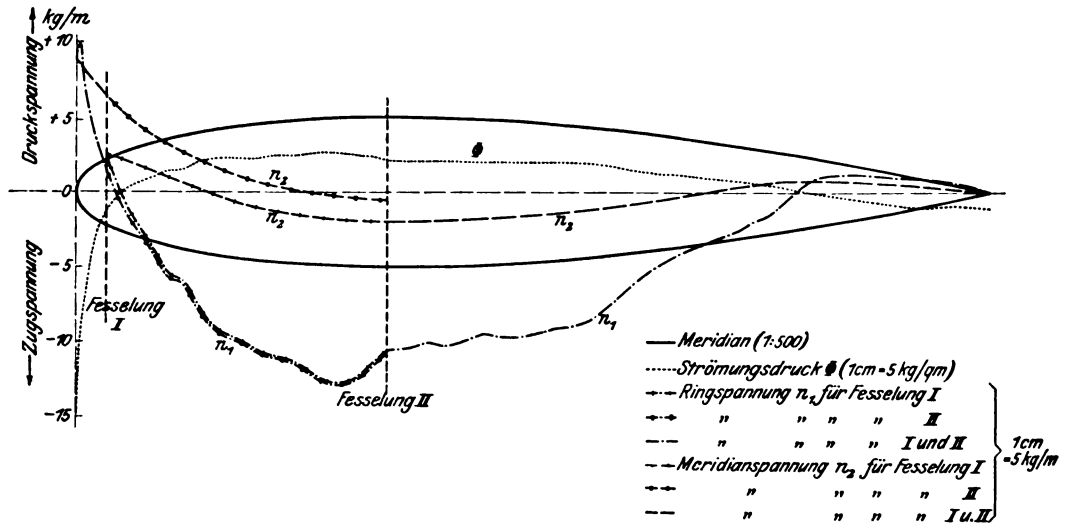


Fig. II. Spannungsverteilung hervorgerufen durch den Strömungsdruck.

Digitized by Google

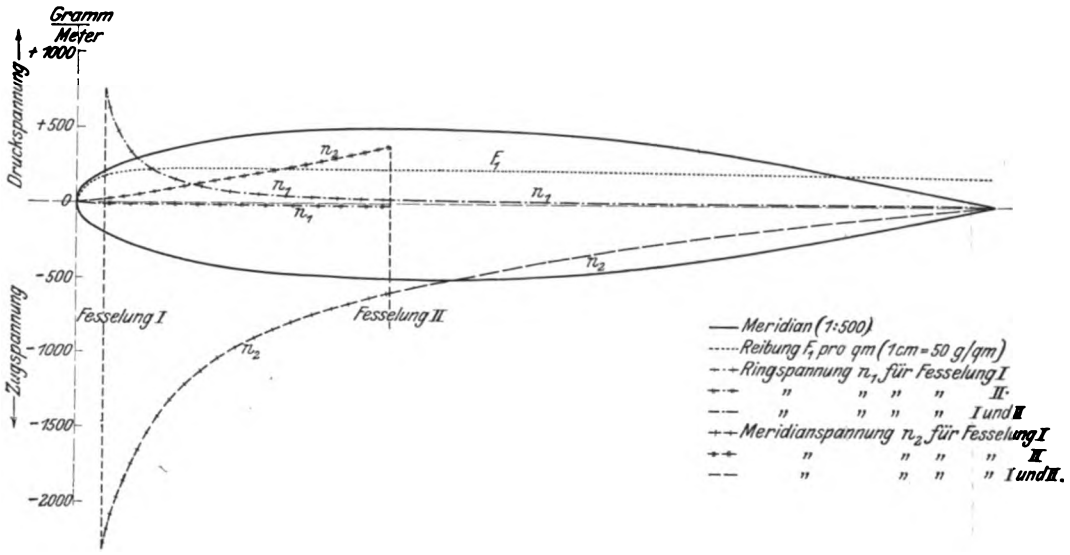


Fig. III. Spannungsverteilung hervorgerufen durch Reibung der Luft an der Hülle.

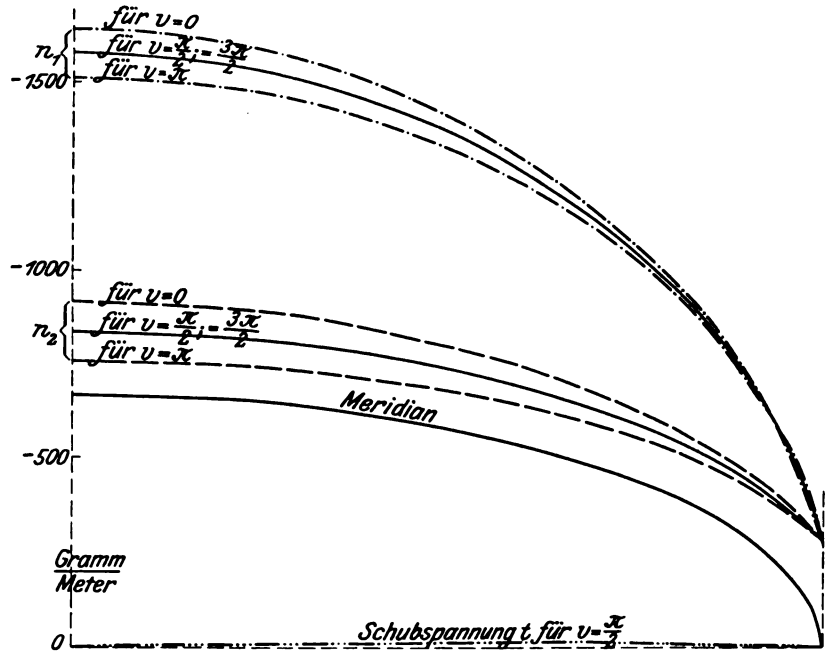


Fig. IV. Spannungsverteilung auf einem verlängerten Rotationsellipsoid.

Äußere Kräfte: konstantes Hüllengewicht $\mu = 0{,}15$ kg/m; Innendruck Φ, proportional mit der Höhe zunehmend. Φ ist am horizontalen Meridian $= 5$ kg/m² und wächst mit der Höhe nach dem Gesetz $\Phi = \Phi_0 + k \cdot h = 5 + 1{,}1 \cdot h$, wobei Wasserstoffüllung angenommen ist. Die Kurven zeigen den Verlauf von n_1, n_2, t für den horizontalen Meridian $\left(v = \frac{\pi}{2}, = \frac{3\pi}{2}\right)$ für den obern und untern Teil des vertikalen Meridians, d. h. für $v = 0$ u. $v = \pi$. Die ausgezogenen Spannungskurven geben zugleich die normalen Spannungen bei konstantem Innendruck $\Phi_0 = 5$ kg/m². Maßstab des Meridians: 1 : 10.

Digitized by Google

Tabelle

Spannungsverteilung für einen Tragkörper

Nr.	Abmessungen des Tragkörpers				Von $\Phi_0 = 25$ kg/m² verurs. Spannung		Strömungsdruck und die durch ihn verursachten Spannungen					
	Z = q Meter	X = p Meter	R_2 Meter	R_2/R_1	$(n_2)\Phi_0$	$(n_1)\Phi_0$	ε	Φ kg/m²	n_2 kg/m Fess. I	n_2 kg/m Fess. II	n kg/m Fess. I	n kg/m Fess. II
1	0,00	0,0	1,2	1	— *14,0*	— *14,0*	— **1,00**	— **14,78**	+ **8,87**	+ **8,87**	+ *8,87*	+ *8,87*
2	0,14	0,58	1,31	0,75	— *16,4*	— *20,8*	— 0,834	— 12,32	+ *8,48*	+ *8,48*	+ **9,79**	+ **9,79**
3	0,52	1,14	1,64	0,53	— *20,5*	— *30,2*	— 0,467	— 6,90	+ *8,47*	+ *8,47*	+ *6,75*	+ *6,75*
4	1,16	1,65	2,00	0,42	— *25,0*	— *39,3*	— 0,24	— 3,55	+ *7,47*	+ *7,47*	+ *3,96*	+ *3,96*
5	1,95	2,10	2,31	0,26	— *28,9*	— *50,0*	— 0,098	— 1,45	+ *6,62* + *2,52*	+ *6,62*	+ *1,63* + *2,69*	+ *1,63*
6	2,83	2,48	2,66	0,21	— *33,3*	— *60,0*	— 0,014	— 0,21	+ *2,31*	+ *5,57*	+ *0,08*	— *0,61*
7	3,73	2,82	3,01	0,18	— *37,6*	— *69,0*	+ 0,026	+ 0,38	+ *1,99*	+ *4,82*	— *1,50*	— *2,01*
8	4,75	3,13	3,28	0,15	— *41,0*	— *76,0*	+ 0,058	+ 0,86	+ *1,57*	+ *4,09*	— *3,06*	— *3,43*
9	5,83	3,43	3,56	0,12	— *44,5*	— *84,0*	+ 0,095	+ 1,40	+ *1,11*	+ *3,38*	— *5,13*	— *5,41*
10	6,92	3,69	3,78	0,10	— *47,3*	— *90,0*	+ 0,101	1,49	+ *0,65*	+ *2,74*	— *5,69*	— *5,90*
11	8,12	3,94	3,99	0,09	— *49,8*	— *95,0*	0,132	1,95	+ *0,21*	+ *2,16*	— *7,81*	— *7,98*
12	9,35	4,15	4,20	0,08	— *52,5*	— *101,0*	0,15	2,22	— *0,22*	+ *1,62*	— *9,30*	— *9,46*
13	10,64	4,33	4,38	0,075	— *54,8*	— *109,6*	0,149	2,20	— *0,58*	+ *1,17*	— *9,60*	— *9,74*
14	12,08	4,52	4,55	0,07	— *56,9*	— *113,8*	0,159	2,35	— *0,95*	+ *0,72*	— *10,61*	— *10,73*
15	13,43	4,64	4,65	0,065	— *58,1*	— *116,2*	0,163	2,41	— *1,20*	+ *0,42*	— *11,12*	— *11,23*
16	14,88	4,76	4,78	0,055	— *59,8*	— *119,6*	0,165	2,44	— *1,46*	+ *0,12*	— *11,59*	— *11,67*
17	16,35	4,86	4,88	0,045	— *61,0*	— *122,0*	**0,176**	**2,60**	— *1,66*	— *0,10*	— *12,61*	— *12,68*
18	17,81	4,95	4,96	Von hier	— *62,0*	— *124,0*	0,174	2,57	— *1,84*	— *0,32*	— **12,76**	— **12,79**
19	19,24	4,98	4,99	abgleich Null	— *62,4*	— *124,8*	0,166	2,45	— *1,90*	— *0,39*	— *12,22*	— *12,25*
20	20,80	**5,00**	**5,00**	gesetzt	— **62,5**	— **125,0**	0,144	2,13	— **1,94**	— *0,41* — **1,94**	— *10,57*	— *10,63* — *10,57*
21	22,03	5,00	5,00	—	— *62,5*	— *125,0*	0,144	2,13	— *1,93*	—	— *10,52*	—
22	23,35	4,98	4,99	—	— *62,4*	— *124,8*	0,136	2,01	— *1,91*	—	— *10,00*	—
23	24,65	4,96	4,97	—	— *62,1*	— *124,2*	0,139	2,06	— *1,87*	—	— *10,23*	—
24	26,06	4,92	4,93	—	— *61,6*	— *123,2*	0,136	2,01	— *1,81*	—	— *9,92*	—
25	27,44	4,88	4,89	—	— *61,1*	— *122,2*	0,132	1,95	— *1,75*	—	— *9,54*	—
26	28,78	4,84	4,85	—	— *60,6*	— *121,2*	0,135	2,00	— *1,69*	—	— *9,70*	—
27	30,18	4,76	4,77	—	— *59,7*	— *119,4*	0,137	2,02	— *1,57*	—	— *9,63*	—
28	31,55	4,68	4,69	—	— *58,6*	— *117,2*	0,133	1,97	— *1,44*	—	— *9,24*	—
29	32,86	4,58	4,59	—	— *57,4*	— *114,8*	0,133	1,97	— *1,28*	—	— *9,03*	—
30	34,18	4,48	4,50	—	— *56,3*	— *112,6*	0,130	+ 1,92	— *1,13*	—	— *8,63*	—
31	35,45	4,35	4,37	—	— *54,6*	— *109,2*	+ 0,118	+ 1,75	— *0,93*	—	— *7,65*	—
32	36,80	4,19	4,21	—	— *52,6*	— *105,2*	0,104	+ 1,54	— *0,71*	—	— *6,48*	—
33	38,14	4,04	4,09	—	— *51,1*	— *102,2*	0,089	+ 1,32	— *0,48*	—	— *5,38*	—
34	39,40	3,94	3,95	—	— *48,9*	— *97,8*	0,081	+ 1,20	— *0,41*	—	— *4,68*	—
35	40,60	3,71	3,75	—	— *46,9*	— *93,8*	0,072	+ 1,06	— *0,18*	—	— *3,99*	—
36	42,38	3,46	3,49	—	— *43,6*	— *87,2*	0,060	+ 0,89	— *0,05*	—	— *3,11*	—
37	43,57	3,27	3,29	—	— *41,1*	— *82,2*	0,056	+ 0,83	+ *0,21*	—	— *2,72*	—
38	44,77	3,07	3,10	—	— *38,8*	— *77,6*	0,046	+ 0,68	+ *0,38*	—	— *2,11*	—
39	45,90	2,87	2,91	—	— *36,4*	— *72,8*	0,041	+ 0,61	+ *0,53*	—	— *1,76*	—
40	47,00	2,67	2,71	—	— *33,9*	— *67,8*	+ 0,020	+ 0,30	+ *0,67*	—	— *0,80*	—
41	48,18	2,46	2,49	—	— *31,2*	— *62,4*	— 0,007	— 0,103	+ *0,76*	—	+ *0,26*	—
42	49,28	2,26	2,31	—	— *28,9*	— *57,8*	— 0,029	— 0,429	+ *0,77*	—	+ *0,99*	—
43	50,40	2,05	2,10	—	— *25,3*	— *50,6*	— 0,037	— 0,547	+ *0,74*	—	+ *1,09*	—
44	51,57	1,85	1,89	—	— *23,6*	— *47,2*	— 0,040	— 0,592	+ *0,72*	—	+ *1,12*	—
45	52,76	1,62	1,66	—	— *20,8*	— *41,6*	— 0,048	— 0,710	+ *0,66*	—	+ *1,18*	—
46	53,95	1,41	1,46	—	— *18,2*	— *36,4*	— 0,053	— 0,784	+ *0,59*	—	+ *1,14*	—
47	55,00	1,22	1,24	—	— *15,5*	— *31,0*	— 0,056	— 0,828	+ *0,53*	—	+ *1,03*	—
48	56,00	0,98	1,00	—	— *12,5*	— *25,0*	— 0,060	— 0,887	+ *0,43*	—	+ *0,89*	—
49	56,70	0,87	0,89	—	—	—	— 0,061	— 0,902	+ *0,38*	—	+ *0,80*	—
50	57,72	0,70	0,68	—	— *8,5*	— *17,0*	— 0,059	— 0,873	+ *0,32*	—	+ *0,59*	—
51	58,55	0,54	0,52	—	— *6,5*	— *13,0*	— 0,062	— 0,917	+ *0,25*	—	+ *0,48*	—
52	59,32	0,39	0,4	—	— *3,8*	— *7,6*	nicht gemessen	—	—	—	—	—
53	60,00	0,26	0,2	—	— *1,9*	— *3,8*	— 0,069	— 1,02	+ *0,13*	—	+ *0,25*	—
54	60,68	0,13	0,1	—	— *0,9*	— *1,8*	nicht gemessen	—	—	—	—	—
55	61,01	0	0,0	—	**0**	**0**	—	—	*0*	—	*0*	—

Maximal- und Minimalwerte sind durch Fettdruck gekennzeichnet. Positive Spannungen
Figur I, II, III.)

Digitized by Google

I.

von der auf Figur I, II, III eingezeichneten Form.

	Reibung und die dadurch verursachten Spannungen				Summe der von Strömungsdruck und Reibung verursachten Spannungen			
	n_2 g/m		n_1 g/m		n_2 kg/m		n_1 kg/m	
F_1 g/m²	Fess. I	Fess. II	Fess. I	Fess. II	Fess. I	Fess. II	Fess. I	Fess. II
0	0	0	0	0	+ 8,87	+ 8,87	+ 8,87	+ 8,87
3	+ 0,5	+ 0,5	— 0,4	— 0,4	+ 8,48	+ 8,48	+ 9,79	+ 9,79
11	+ 3,8	+ 3,8	— 2,1	— 2,1	+ 8,47	+ 8,47	+ 6,75	+ 6,75
15	+ 11,2	+ 11,2	— 4,7	— 4,7	+ 7,48	+ 7,48	+ 3,96	+ 3,96
18	+ 22,4 — 2610	+ 22,4	— 6,6 + 770	— 6,6	+ 6,64 — 0,09	+ 6,64	+ 1,63 + 3,46	+ 1,63
20	— 2060	+ 35,8	+ 440	— 7,5	+ 0,25	+ 5,61	+ 0,52	— 0,61
20,5	— 1770	+ 49,6	+ 320	— 8,9	+ 0,22	+ 4,87	— 1,18	— 2,02
21,2	— 1560	+ 66,2	+ 240	— 11,0	+ 0,01	+ 4,16	— 2,82	— 3,44
21,8	— 1380	+ 84,1	+ 170	— 10,1	— 0,27	+ 3,46	— 4,96	— 5,42
22,0	— 1240	+ 101	+ 130	— 10,0	— 0,59	+ 2,84	— 5,56	— 5,91
22,6	— 1140	+ 122	+ 105	— 11,0	— 0,93	+ 2,28	— 7,71	— 7,99
23,0	— 1040	+ 144	+ 82	— 11,3	— 1,26	+ 1,76	— 9,22	— 9,47
23,0	— 963	+ 166	+ 74	— 12,8	— 1,54	+ 1,34	— 9,53	— 9,75
23,1	— 887	+ 194	+ 66	— 14,4	— 1,84	+ 0,91	— 10,0	— 10,74
23,2	— 830	+ 220	+ 54	— 11,2	— 2,03	+ 0,64	— 11,07	— 11,24
23,3	— 770	+ 249	+ 35	— 11,0	— 2,23	+ 0,37	— 11,55	— 11,68
23,5	— 721	+ 280	+ 29	— 10,9	— 2,38	+ 0,18	— 12,58	— 12,69
23,5	— 670	+ 310	linear gegen Null abfallend		— 2,51	— 0,01	von hier ab = $(n_1)\varphi$	
23,3	— 636	+ 341			— 2,54	— 0,05		
22,9	— 590	+ 878 — 590	—	—	— 2,53	— 0,02 — 2,58	—	—
22,9	— 562	—	—	—	— 2,49	—	—	—
22,7	— 532	—	—	—	— 2,44	—	—	—
22,8	— 507	—	—	—	— 2,38	—	—	—
22,7	— 477	—	—	—	— 2,29	—	—	—
22,6	— 447	—	—	—	— 2,20	—	—	—
22,7	— 420	—	—	—	— 2,01	—	—	—
22,7	— 393	—	—	—	— 1,96	—	—	—
22,6	— 368	—	—	—	— 1,81	—	—	—
22,6	— 345	—	—	—	— 1,62	—	—	—
22,6	— 323	—	—	—	— 1,45	—	—	—
22,4	— 302	—	—	—	— 1,23	—	—	—
22,1	— 280	—	—	—	— 0,99	—	—	—
21,8	— 261	—	—	—	— 0,74	—	—	—
21,6	— 240	—	—	—	— 0,65	—	—	—
21,4	— 226	—	—	—	— 0,41	—	—	—
21,2	— 202	—	—	—	— 0,25	—	—	—
21,1	— 188	—	—	—	+ 0,03	—	—	—
20,9	— 173	—	—	—	+ 0,21	—	—	—
20,8	— 158	—	—	—	+ 0,37	—	—	—
20,4	— 147	—	—	—	+ 0,52	—	—	—
19,9	— 134	—	—	—	+ 0,63	—	—	—
19,4	— 121	—	—	—	+ 0,65	—	—	—
19,3	— 110	—	—	—	+ 0,63	—	—	—
19,2	— 97	—	—	—	+ 0,62	—	—	—
19,0	— 85	—	—	—	+ 0,58	—	—	—
18,9	— 72	—	—	—	+ 0,52	—	—	—
18,9	— 62	—	—	—	+ 0,47	—	—	—
18,8	— 54	—	—	—	+ 0,38	—	—	—
18,8	— 46	—	—	—	+ 0,33	—	—	—
18,8	— 34	—	—	—	+ 0,29	—	—	—
18,7	— 26	—	—	—	+ 0,22	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,6	— 10	—	—	—	+ 0,12	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	0	—	—	—	0	—	—	—

bedeuten Druckspannungen. Negative Spannungen bedeuten Zugspannungen. (Vergleiche hierzu

Digitized by Google

Tabelle II.

Spannungsverteilung auf einem verlängerten Rotations-Ellipsoid-$\left(\text{Achsen } \begin{matrix} a = 1\,m \\ b = {}^1/_3 m \end{matrix}\right)$, wenn als äußere Kräfte ein konstantes Oberflächengewicht $\mu = 0{,}15\,kg/m^2$ und ein proportional mit der Höhe zunehmender Innendruck $\Phi = \Phi_0 + k\,h = 5 + 1{,}1\,h\ (kg/m^2)$ wirken.

φ	z cm	x cm	$(n_2)_{\Phi_0}$	$(n_1)_{\Phi_0}$	ν_2	τ	ν_1	$v = 0$		$v = \pi$		tg 2 α	α
								n_1	n_2	n_1	n_2		
0°	100	0,0	— 278	— 278	0	0	0	— 278	— 278	— 278	— 278	0/0	unbest
5°	99,6	2,9	— 286	— 302	1	1	— 0	— 302	— 287	— 302	— 285	0,125	3,6°
10°	98,4	5,8	— 310	— 370	3	4	— 2	— 368	— 313	— 372	— 307	0,133	3,8°
15°	96,4	8,6	— 345	— 466	6	7	— 3	— 463	— 351	— 469	— 339	0,116	3,3°
20°	94,0	10,9	— 388	— 576	10	11	— 3	— 573	— 398	— 579	— 378	0,122	3,4°
25°	90,4	14,1	— 433	— 689	14	13	+ 1	— 690	— 447	— 688	— 419	0,105	3,0°
30°	86,6	16,6	— 481	— 802	19	15	+ 4	— 806	— 500	— 798	— 462	0,093	2,6°
35°	82,0	19,1	— 530	— 915	25	16	8	— 924	— 555	— 906	— 505	0,084	2,4°
40°	76,6	21,4	— 576	— 1017	32	18	15	— 1032	— 608	— 1002	— 544	0,080	2,3°
45°	70,8	23,6	— 622	— 1118	40	18	21	— 1139	— 662	— 1097	— 582	0,073	2,1°
50°	64,3	25,5	— 662	— 1207	46	18,5	28	— 1235	— 708	— 1179	— 616	0,070	1,9°
55°	57,4	27,3	— 702	— 1292	53	18	35	— 1327	— 756	— 1257	— 648	0,062	1,7°
60°	50,0	28,8	— 735	— 1363	59	17	41	— 1404	— 794	— 1322	— 676	0,056	1,6°
65°	42,4	30,2	— 764	— 1425	64	15	48	— 1473	— 828	— 1377	— 700	0,046	1,3°
70°	34,2	31,3	— 789	— 1480	68	13	54	— 1534	— 857	— 1426	— 721	0,038	1,1°
75°	25,9	32,2	— 808	— 1522	74	10	58	— 1580	— 882	— 1464	— 734	0,029	0,8°
80°	17,4	32,8	— 822	— 1549	77	7	61	— 1610	— 899	— 1488	— 745	0,020	0,6°
85°	8,7	33,2	— 831	— 1569	78	4	63	— 1632	— 909	— 1506	— 753	0,010	0,3
90°	0,0	33,3	— 833	— 1573	79	0	64	— 1637	— 912	— 1509	— 754	0,000	0°

Die Spannungen sind in g/m angegeben. Vergleiche hierzu Fig. IV.

Digitized by Google

Bericht über die Göttinger Modellversuchsanstalt.

Von

Professor Dr. **L. Prandtl**-Göttingen.

Digitized by Google

Digitized by Google

A. Besitzveränderung.

Die Begründerin und bisherige Erhalterin der Modellversuchsanstalt, die „Motorluftschiff-Studiengesellschaft", ist, nachdem sie ihre Liquidation beschlossen hatte, durch Vermittlung der „Göttinger Vereinigung zur Förderung der angewandten Physik und Mathematik", die bereits seit mehreren Jahren regelmäßig Mittel zum Betriebe der Anstalt beigesteuert hatte, mit der Königlich Preußischen Unterrichtsverwaltung behufs Übernahme der Modellversuchsanstalt in Verhandlung getreten. Die von der Motorluftschiff-Studiengesellschaft angebotenen Bedingungen wurden kurz vor Abschluß dieses Berichtes von der Unterrichtsverwaltung angenommen, und es ist dadurch die Modellversuchsanstalt in das Eigentum der Universität Göttingen übergegangen. Da die preußische Unterrichtsverwaltung in höchst dankenswerter Weise einen den bisherigen Leistungen der Motorluftschiff-Studiengesellschaft etwa entsprechenden Betriebszuschuß zugesagt hat, und die Göttinger Vereinigung ihren bisherigen jährlichen Beitrag auch weiter zur Verfügung stellt, erscheint das Weiterbestehen der Versuchsanstalt für die nächsten Jahre als gesichert.

Die Motorluftschiff-Studiengesellschaft hat in den Jahren 1907—1912 einschließlich eines Betrages für Vorarbeiten eine Gesamtsumme von 45 500 M. für die Modellversuchsanstalt aufgewandt, von der rund 2500 M. für die Vorarbeiten, 20 000 M. für Bau und Einrichtung und 22 500 M. für den Betrieb während der Jahre 1908—1912 gerechnet werden können.

Die aerodynamische Wissenschaft ist der Motorluftschiff-Studiengesellschaft für diese Leistungen zu großem Danke verpflichtet.

B. Versuchstätigkeit.

1. Die umfangreichste Arbeit des Berichtsjahres war leider unproduktiver Art; sie bestand in einer vollständigen Erneuerung der Ausregulierung des Luftstroms des Versuchskanals. Nachdem schon einige Zeit vorher bei den Geschwindigkeitsmessungen festgestellt worden war, daß die frühere gute Ausgleichung der Geschwindigkeit über den Kanalquerschnitt nicht mehr sehr befriedigend war, hatte sich das Übel im Herbst 1912 so verschlimmert, daß man sich zu einer Neuregulierung entschloß. Die Veränderungen waren, wie später festgestellt wurde, zum überwiegenden Teil durch das Rosten eines Siebes entstanden. Bei Gelegenheit dieser Erneuerungsarbeiten wurde die ganze Luftführung vom Ventilator bis zum Versuchskanal einer Nacharbeit unterzogen: ein Leitapparat aus Zinkblech, der sich allmählich durch sein Eigengewicht verbogen hatte, wurde durch einen stärkeren aus Eisenblech ersetzt; im „feinen Gleichrichter" wurden eine Anzahl Elemente, deren Form nicht genau genug war, durch neue ersetzt.

Digitized by Google

Die Neuregulierung wurde, abweichend von dem früheren Verfahren (Jahrbuch 1908/10, S. 141), dadurch bewerkstelligt, daß ein neues vor den feinen Gleichrichter gespanntes Sieb an den Stellen, wo die Geschwindigkeit zu groß war, einen einmaligen oder mehrmaligen dünnen Anstrich mit Eisenlack erhielt; an Stellen mit zu kleiner Geschwindigkeit wurden einzelne Drähte aus dem Sieb entfernt. Die letzten kleinen Unterschiede wurden dann in der früheren Art durch vorgehängte Drahtbügel ausgeglichen. Als Resultat der Ausgleichung ist bis jetzt erreicht worden, daß in dem mittleren Quadratmeter die Geschwindigkeit — von kleinen lokalen Störungen abgesehen — nirgends um mehr als $\pm 1\frac{1}{2}$ v. H. vom normalen Wert abweicht. Die Regulierungsarbeit soll noch fortgesetzt werden, um einige über größere Gebiete ausgedehnte Störungen zu beseitigen.

Bei Gelegenheit der Ausregulierung wurde auch noch ein weiterer Übelstand beseitigt, der uns schon seit längerem aufgefallen war. Die Geschwindigkeit zeigte in der Strömungsrichtung eine deutliche Zunahme (um etwa 1,4 v. H. auf jeden Meter der Kanallänge). Es kam dies davon her, daß beim Eintritt in die Versuchsstrecke durch die vorausgegangenen Gleichrichter und das Sieb eine fast bis zum Rande gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung hervorgebracht wird, nun aber beim Entlangströmen an den Kanalwänden die Randschichten des Stromes verzögert und dadurch auch verdickt werden. Hierdurch wird wegen des konstanten Kanalquerschnitts der Querschnitt der mittleren Strompartien verkleinert, die Strömung hier also zu einer Geschwindigkeitserhöhung gezwungen. Um diesen Übelstand abzustellen, haben wir den Kanal durch Einfügung von passenden Zwischenlagen zwischen den vier Wänden und dem dahinter befindlichen Balkengerüst leicht konisch gemacht. Der Eintrittsquerschnitt wurde dabei in Höhe und Breite um 6 cm verringert, der Austrittsquerschnitt unverändert belassen. Durch diese Veränderung ist, der Vorausberechnung entsprechend, die Geschwindigkeitszunahme praktisch zum Verschwinden gebracht worden.

2. Bei den im vorjährigen Bericht bereits als abgeschlossen bezeichneten systematischen Versuchen mit Schraubenmodellen hat leider die rechnerische Durcharbeitung ergeben, daß die Versuche — wesentlich durch das mangelhafte Arbeiten der längsverschieblichen Kupplung (K in Fig. 1 des vorjährigen Berichtes) sowie der Kardanwelle des Dynamometers (D) — eine sehr geringe Genauigkeit aufweisen. Man entschloß sich daher, nach einem entsprechenden Umbau der Versuchseinrichtung, die ganze Versuchsreihe zu wiederholen. Die neuen Versuche erwiesen sich als wesentlich besser als die alten; es wurden daher der weiteren Verarbeitung nur die neuen Versuche zugrunde gelegt. Ein näheres Eingehen auf die Ergebnisse erübrigt sich an dieser Stelle, da die im nächsten Abschnitt folgende Abhandlung von Herrn Dipl.-Ing. A. Betz den Gegenstand in aller Ausführlichkeit behandelt.

3. An sonstigen Versuchsarbeiten ist zu erwähnen die Fortführung und Vollendung der Untersuchung über Doppeldecker. Diese hat — in guter Übereinstimmung mit theoretischen Überlegungen — ergeben, daß mit Doppeldeckern nicht dieselben günstigen Werte des Güteverhältnisses A : W (Auftrieb : Widerstand) erreicht werden wie mit Eindeckern, daß aber die Doppeldecker doch, sobald nicht Schnelligkeit, sondern im Gegenteil große Tragfähigkeit bei geringer

Digitized by Google

Geschwindigkeit in Frage kommt, von Vorteil sind. Von diesen Verhältnissen kann man sich mittels des folgenden Diagramms ein gutes Bild machen, in dem für einige Flächentypen das Güteverhältnis $\frac{A}{W}$ als Ordinate zu einer Größe

$$\varphi = \frac{A}{\frac{\gamma}{g} v^2 l^2}$$

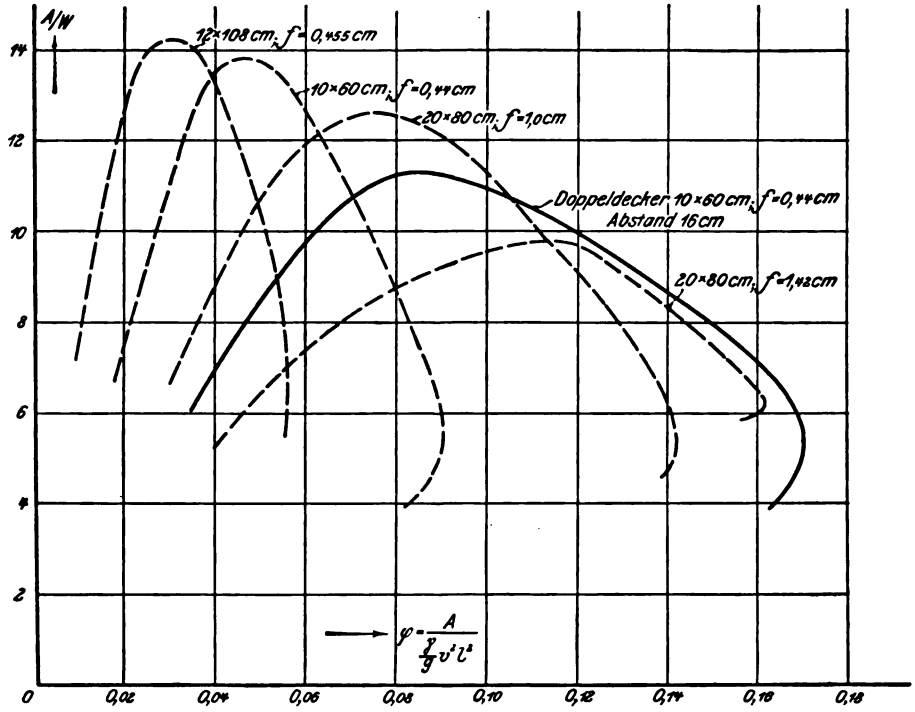


Fig. 1. Güteverhältnis von Tragflächen, abhängig von der spezifischen Belastung.

als Abszisse aufgetragen ist, die man passend als spezifische Belastung bezogen auf die Spannweite (l) bezeichnen kann. Die Spannweite ist häufig durch andere Überlegungen im voraus bestimmt; hat man nun die Aufgabe, für eine gegebene Spannweite l eine Tragfläche so zu finden, daß sie bei einer gegebenen Geschwindigkeit v einen vorgeschriebenen Auftrieb A entwickelt, so ist die vorhin eingeführte spezifische Belastung φ völlig bestimmt; die günstigste Fläche ist dann diejenige, die bei diesem Werte von φ den kleinsten Widerstand, also das größte A : W liefert. Man sieht aus Fig. 1, in der zu den Kurven von einer Reihe von Eindeckerflächen (nach den Messungen von O. Föppl) die Kurve für einen Doppeldecker (nach den Messungen von A. Betz) hinzugefügt ist, daß für kleine Werte von φ die Eindecker obenanstehen, für große dagegen der Doppeldecker.

4. In fremdem Auftrage sind Versuche verschiedener Art gemacht worden. Eichungen von Geschwindigkeitsmessern für das Institut für angewandte Mechanik der Universität Göttingen, für Wilh. Moroll in Leipzig; Eichung eines Windrichtungsanzeigers für die Firma Siemens und Halske; Bestimmung von Auftrieb

Digitized by Google

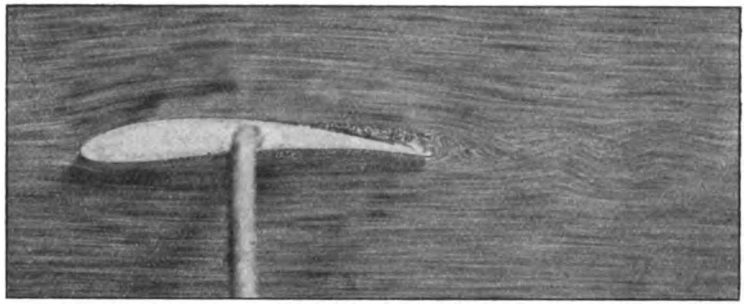


Fig. 3.

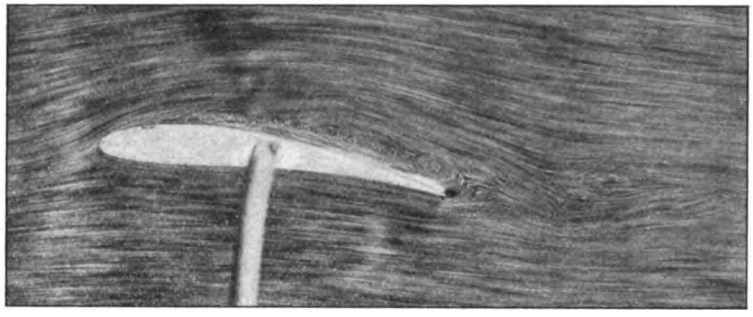


Fig. 4.

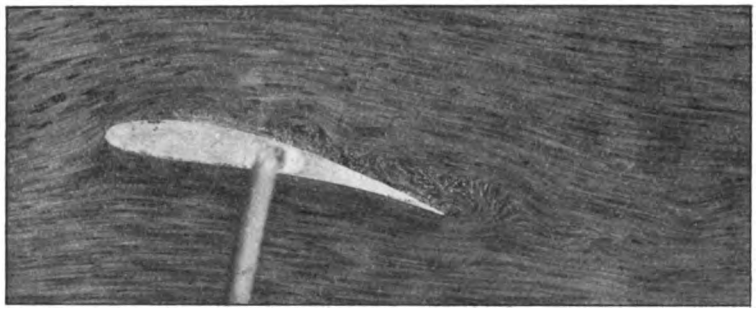


Fig. 5.

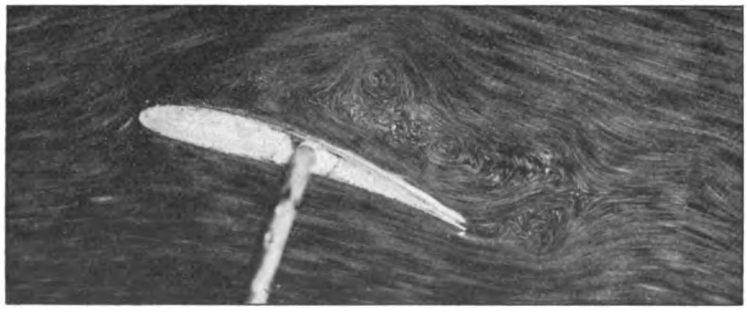


Fig. 6.

Digitized by Google

Fig. 7.

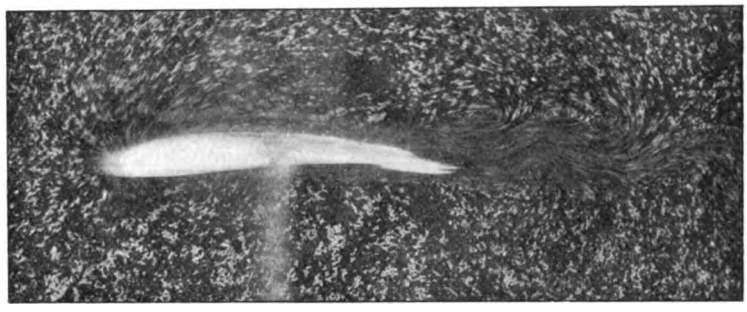


Fig. 8.

Fig. 9.

Fig. 3—9: Strömungsaufnahmen, nach dem Ahlbornschen Verfahren erhalten (Lykopodium auf Wasseroberfläche, mit Blitzlicht aufgenommen). Gleichförmige Bewegung eines Flügelprofils von Schukowskischer Form, durch ruhendes Wasser, bei verschiedener Neigung gegen die Bewegungsrichtung. In Fig. 3—7 ist die photogr. Kamera mit dem Körper mitbewegt. Neigung der mittleren Sehne 0^0, 8^0, 13^0, 17^0 und 19^0. Die Strömung liegt, abgesehen von kleinen Ablösungen, bei Fig. 3—5 im wesentlichen an der Platte an, löst sich aber in Fig. 6 und 7 von ihr immer mehr ab. Dem entspricht ein Nachlassen des erst mit zunehmendem Winkel sehr stark anwachsenden Auftriebs. Man beachte die mit dem Auftrieb zusammenhängende vorne aufsteigende, hinten absteigende Strömung sowie ihr Fehlen bei Fig. 3. In Fig. 8 u. 9 (Neigung 0^0 und 10^0) ruht die photographische Kamera. Man beachte die Quellströmung am Kopf, den Nachlauf hinter der Platte sowie bei Fig. 9 die mit dem Auftrieb zusammenhängende Umlaufs- (Zirkulations-) Strömung.

Digitized by Google

und Widerstand sowie Lage des Druckmittelpunktes auf eingesandte Tragflächenmodelle von Mr. Lanchester in Birmingham, Dr. Geest in Johannisthal u. a.; Messung an Schraubenmodellen. Für den Luftschiffbau Zeppelin wurden vergleichende Widerstandsmessungen an einem Luftschiffkörper mit Laufgang und Gondeln und ohne diese Anhängsel gemacht, ferner Messungen über die Verteilung der Luftströmung in der Nachbarschaft des Luftschiffkörpers. Diese letzteren Messungen wurden unternommen, um die Frage der Messung der Eigengeschwindigkeit des Luftschiffes durch vom Luftschiff herabhängende Staugeräte zu klären; es ergab sich, daß unter der vorderen Gondel sehr gesetzmäßig verlaufende Geschwindigkeitsabweichungen von bis zu 2,5% der Fahrtgeschwindigkeit bestehen, unter der hinteren Gondel dagegen nur solche bis zu 1%, so daß also mit Berücksichtigung der durch den Modellversuch ermittelten Korrektionen eine sehr zuverlässige Geschwindigkeitsmessung zu erwarten ist. — An weiteren Untersuchungen ist noch die Bestimmung des Windschattens hinter einem Ballonhallenmodell und Ermittlung der Druckverteilung bei einem Gasbehältermodell zu erwähnen.

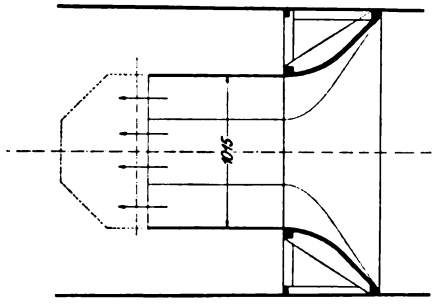


Fig. 2. Düse.
Maßstab 1 : 50.

5. In der Vorbereitung begriffen sind Versuche zum Studium des Ähnlichkeitsgesetzes. Es soll an einer größeren Reihe von kreisförmigen Platten, von Kugeln und von geometrisch ähnlichen Ballonmodellen die Abhängigkeit des Widerstandes von den Abmessungen und von der Geschwindigkeit untersucht werden. Um einen größeren Bereich von Geschwindigkeiten zu haben, ist eine Düse von 1,015 m Durchmesser angefertigt worden, die nach Art der Eiffelschen Versuchsanstalt einen freien Strahl innerhalb des Versuchskanals erzeugt. Bis jetzt sind 23 m/sec damit erreicht worden, gegenüber 10 m/sec bei der bisherigen Einrichtung. Die Geschwindigkeit dürfte sich durch den Einbau eines Diffusors noch weiter steigern lassen. Einen Schnitt durch die Düse, die achteckigen Querschnitt hat, zeigt die Figur 2.

In Vorbereitung sind ferner Versuche über die günstigsten Tragflächen- und Luftschraubenprofile, bei denen, um die Versuchsbedingungen möglichst zu vereinfachen, der Versuchskörper zwischen zwei parallelen Wänden aufgestellt werden soll, so daß eine ebene Strömung entsteht. Man scheidet auf diese Weise die verwickelten Vorgänge aus, die sich an den Flügelenden einstellen, und erhält einen reinlichen Aufschluß über das Verhalten des einzelnen Flügelelements.

Beabsichtigt sind im Anschluß hieran Versuche zur Prüfung der Flügelelemententheorien, ferner Versuche über die die Seitenstabilität bestimmenden Größen, Versuche über die Strömungsvorgänge an den Flügelenden, endlich Versuche über den Einfluß des Flugzeugrumpfes auf die Trag- und Widerstandskräfte.

6. Im Zusammenhang mit diesem Berichte über die Versuchstätigkeit der Modellversuchsanstalt sei erwähnt, daß die von der preußischen Unterrichtsverwaltung ins Leben gerufene Luftschraubenprüfstelle der Universität Göttingen in Arenshausen bei Göttingen in diesem Frühjahr dem praktischen

Digitized by Google

Betrieb hat übergeben werden können. Die Prüfstelle hat den seinerzeit auf der Frankfurter Luftschiffahrtsausstellung „Ila" in Betrieb gewesenen Schraubenprüfwagen erworben und einem Umbau unterzogen (Einbau eines besonderen Fahrmotors, Verstärkung des Rahmens usw.). Durch eine Reihe weiterer Verbesserungen, besonders an den Meßeinrichtungen, ist er jetzt zu befriedigendem Arbeiten gebracht. —

Die Arbeiten der Modellversuchsanstalt erfahren eine weitere Ergänzung durch Arbeiten im Institut für angewandte Mechanik. So werden hier an einer kleinen Modellschleppeinrichtung mittels Photographie und Kinematographie Versuche über die Strömungsformen bei der Bewegung von Körpern durchgeführt. Die Figuren 3—9 geben ein Bild von diesen Arbeiten. Sie stellen die Strömung um eine Tragfläche bei verschiedenen Steigungswinkeln dar und lassen die verwickelten Wirbelungsvorgänge, die hierbei auftreten, gut erkennen.

Weiter werden Versuche über die Luftkräfte beim Bewegungsbeginn mittels einer kinematographischen Methode gemacht.

C. Personalien.

Am 1. September 1912 wurde dem bisher von der Göttinger Vereinigung besoldeten Beobachter Herrn Dipl.-Ing. A. Betz die Leitung der Schraubenversuche in Arenshausen (vgl. oben B. 6) übertragen; er konnte jedoch wegen der häufigen Betriebspausen dieser Versuche noch weiter für die Anstalt tätig sein. Die erledigte Stelle wurde zum gleichen Zeitpunkt Herrn Dr.-Ing. C. Wieselsberger übertragen.

Herr Dr.-Ing. G. Fuhrmann, der die von Mitteln der Motorluftschiff-Studiengesellschaft unterhaltene Assistentenstelle seit Anbeginn — mit Unterbrechung während seines Militärdienstjahres — innegehabt hatte, schied Anfang Oktober 1912 aus, um in den Dienst der neugegründeten Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt zu treten. Seine Stelle ist wegen einer Reihe von Schwierigkeiten erst am 1. Juli 1913 durch Herrn Dipl.-Ing. Dr. L. Heis wieder besetzt worden.

Die Besetzung der Mechanikerstellen war die gleiche wie seit zwei Jahren.

D. Verzeichnis der im Berichtsjahr erschienenen Publikationen.

Mitteilungen der Göttinger Modellversuchsanstalt. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt. Jahrg. III (1912) S. 217, Jahrg. IV (1913) S. 1 u. S. 89:

A. Betz: Auftrieb und Widerstand einer Tragfläche in der Nähe einer horizontalen Fläche (Erdboden).

A. Betz: Auftrieb und Widerstand eines Doppeldeckers.

G. Fuhrmann: Untersuchungen an einem Propellermodell.

L. Prandtl: Abriß der Lehre von der Flüssigkeits- und Gasbewegung. Jena, bei G. Fischer, 1913 (Sonderdruck von zwei Artikeln für das „Handwörterbuch der Naturwissenschaften" Bd. IV, S. 101 u. 544).

A. Betz: Ein Beitrag zur Erklärung des Segelflugs. Zeitschr. f. Fl. u. M. 1912, S. 269.

A. Betz: Wirtschaftliche Gesichtspunkte beim Entwurf von Flugzeugen. Zeitschr. f. Fl. u. M. 1913, S. 79 u. 109.

C. Wieselsberger: Der Flug bei geringstem Brennstoffverbrauch. Zeitschr. f. Fl. u. M. 1913, S. 16.

Digitized by Google

Digitized by Google

Systematische Versuche an Luftschrauben-Modellen.

Von

Dipl.-Ing. **Alb. Betz**-Göttingen.

Digitized by Google

Digitized by Google

Die Versuche, deren Ergebnisse im folgenden wiedergegeben sind, sollten in erster Linie dazu dienen, einen Überblick über die Einflüsse zu gewinnen, von denen die Güte und Brauchbarkeit einer Luftschraube für einen bestimmten Zweck abhängt. Um bei den Resultaten möglichst frei von Nebenumständen zu bleiben, und um die rechnerische Bearbeitung derselben zu erleichtern, wurden zunächst möglichst einfache Formen gewählt — rechteckige Flächen mit ebenen und kreisbogenförmig gewölbten Profilen. Im ganzen gelangten 72 Modifikationen von Schraubenformen zur Untersuchung, die durch systematische Änderung verschiedener Größen auseinander hervorgingen.

I. Versuchsgegenstand und Versuchseinrichtung.

Den Ausgangspunkt für die Formen sämtlicher Schraubenflügel bildete eine mathematische Schraubenfläche von D = 50 cm Durchmesser und H = 40 cm Steigung (D/H = 1,25). Die Flügel, die in ihrer Normalstellung dieser Schraubenfläche entsprachen, konnten auf ihrer Nabe verdreht werden, so daß die Flügelprofile unter verschiedenen über die Länge des Flügels konstanten Winkeln (β) gegenüber der zugehörigen Schraubenlinie eingestellt werden konnten. In Figur 1 ist die geometrische Gestalt eines solchen Flügels wiedergegeben. In der sonst üblichen Bezeichnungsweise erhält man durch die Verdrehung der Flügel Schrauben mit radial veränderlicher Steigung; nur für $\beta = 0^0$ ist die Steigung konstant (= 40 cm). Die benutzten Profile waren teils eben, teils gewölbt (Pfeilhöhe: Sehne = 1/25) und von verschiedener Breite (3 cm, 4,5 cm und 6 cm), sie sind in Figur 2 zusammengestellt.

Es wurden demnach an den Versuchsmodellen folgende, die Gestalt der Schraube bestimmende Größen variiert:

1. Die Zahl der Flügel. Es wurden 2-, 3- und 4-flügelige Schrauben untersucht.
2. Der Anstellwinkel β des Profiles gegenüber der mathematischen Schraubenfläche. Er betrug -3^0, 0^0, 3^0 und 5^0.
3. Die Breite der Flügel (3, 4,5 und 6 cm).
4. Die Wölbung des Profiles (Wölbungspfeil: Sehne = 0 und 1/25).

Die Versuchseinrichtung, mit der diese Messungen ausgeführt wurden, ist gegenüber der im letzten Jahrbuch beschriebenen etwas abgeändert, da mit der früher vorhandenen, längsverschiebbaren Kuppelung die Schubmessungen sich nicht mit der wünschenswerten Genauigkeit ausführen ließen[1]). Die neue Ein-

[1]) Die Versuche waren bereits vor längerer Zeit von Herrn Béjeuhr durchgeführt worden, von dem auch die Versuchseinrichtung im Wesentlichen konstruiert worden ist. Leider zeigten sich bei der Auswertung dieser ersten Messungen so erhebliche Unstimmigkeiten, daß es sich als notwendig erwies, die Versuche unter Vermeidung der hauptsächlichsten Fehlerquellen noch einmal auszuführen.

Digitized by Google

richtung vermeidet diese Kuppelung, indem das ganze Kegelradgetriebe G_2 (Fig. 3) in der Richtung der Propellerachse sich bewegen kann, was durch die beiden Kardane K_3 und K_4 und eine entsprechende, aus der Figur ersichtliche Aufhängung er-

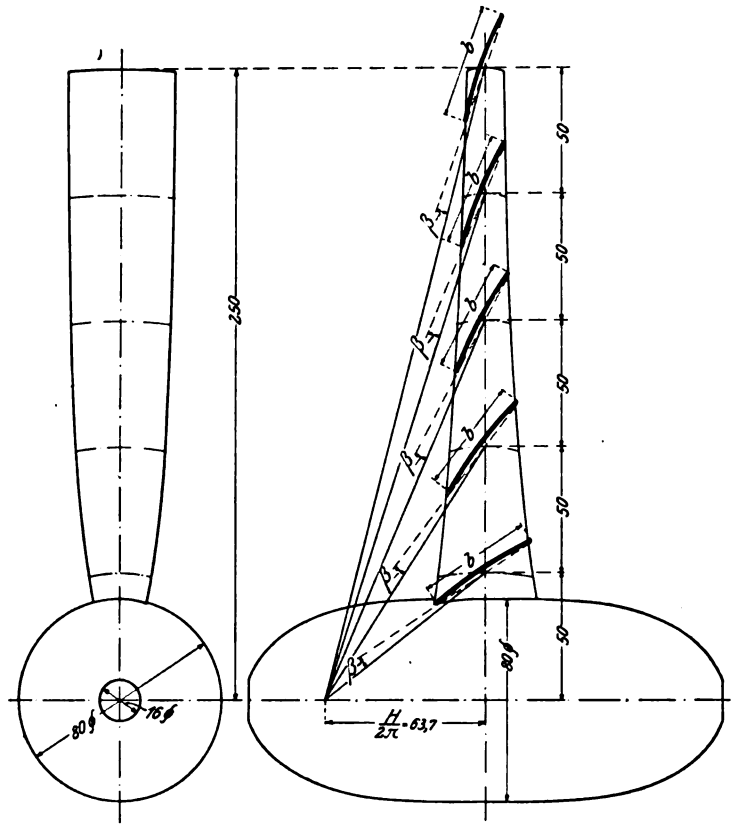


Fig. 1.

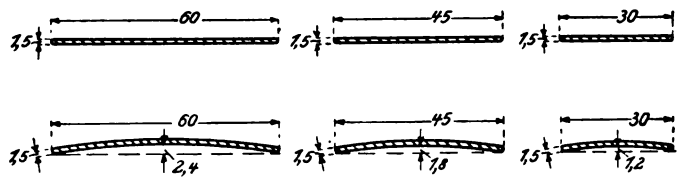


Fig. 2. Die 6 untersuchten Flügelprofile.

möglicht ist. Die Einrichtung zur Messung des Drehmomentes wurde im wesentlichen unverändert beibehalten, das Gehäuse des Kegelradgetriebes G_1 ist drehbar gelagert, und die auftretenden Reaktionen werden durch ein Laufgewicht ausgeglichen, aus dessen Verschiebung man die Änderungen des Drehmomentes erhält. Da bei gewöhnlichen Kardanen die auftretenden Reibungskräfte von erheblichem Einfluß auf die Messungen waren, wurden die Kardane K_2 und K_3 als elastische Gelenke ausgebildet. Der Kardan K_4 gestattet eine geringe axiale Verschiebung. Das Getriebe G_2 sowie die daran anstoßenden, dem Schraubenstrahl direkt aus-

Digitized by Google

gesetzten Gestängeteile waren durch eine vor denselben angebrachte Blechkappe vor den Wirkungen des Schraubenwindes möglichst geschützt. (In der Figur 3 wurde dieselbe der Übersichtlichkeit halber weggelassen.)

Die Einrichtung der Versuchsanstalt zur Erzeugung und Konstanthaltung eines gleichmäßigen Luftstromes darf wohl aus früheren Veröffentlichungen (Jahrbuch d. M. St. G. 1908/10 und Z. d. V. d. J. 1909) als bekannt vorausgesetzt werden. Dagegen wird die Einrichtung zur Konstanthaltung der Tourenzahl des Propellers von Interesse sein. Der Zeiger eines bei T (Fig. 3) an die Zuleitungswelle zum Propeller angeschlossenen Tachometers (Fig. 4) spielt zwischen 2 Platinkontakten und führt durch Vermittlung eines noch dazwischen geschalteten Relais bald der einen bald der anderen der beiden Spulen S der elektromagnetischen Kuppelung Fig. 5 Strom zu, je nachdem der Zeiger nach der einen oder anderen Seite von der durch die Einstellung der Kontakte gegebenen Stelle abweicht. Die als Elektromagnete ausgebildeten Schnurscheiben K (Fig. 5) werden vom Antriebsmotor des Pro-

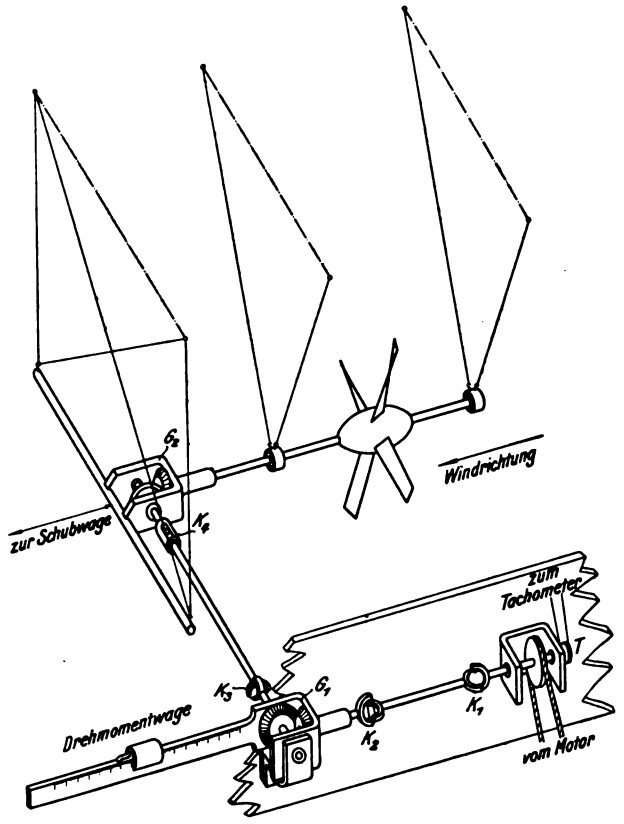


Fig. 3.

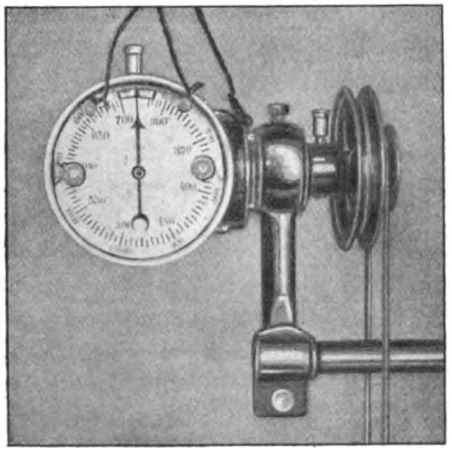


Fig. 4.

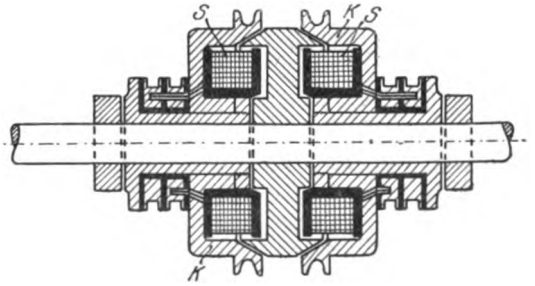


Fig. 5. Elektromagnetische Kupplung zur Tourenzahlregulierung.

Digitized by Google

pellers aus in entgegengesetztem Sinn in Umdrehung versetzt. So oft nun das Tachometer Kontakt gibt, wird eine dieser Scheiben mit dem fest auf der Welle sitzenden Mittelteil gekuppelt. Durch die Drehung dieser Welle, die ein Gewinde trägt, wird ein Schieberwiderstand solange verstellt, bis der Propeller wieder seine richtige Tourenzahl hat.

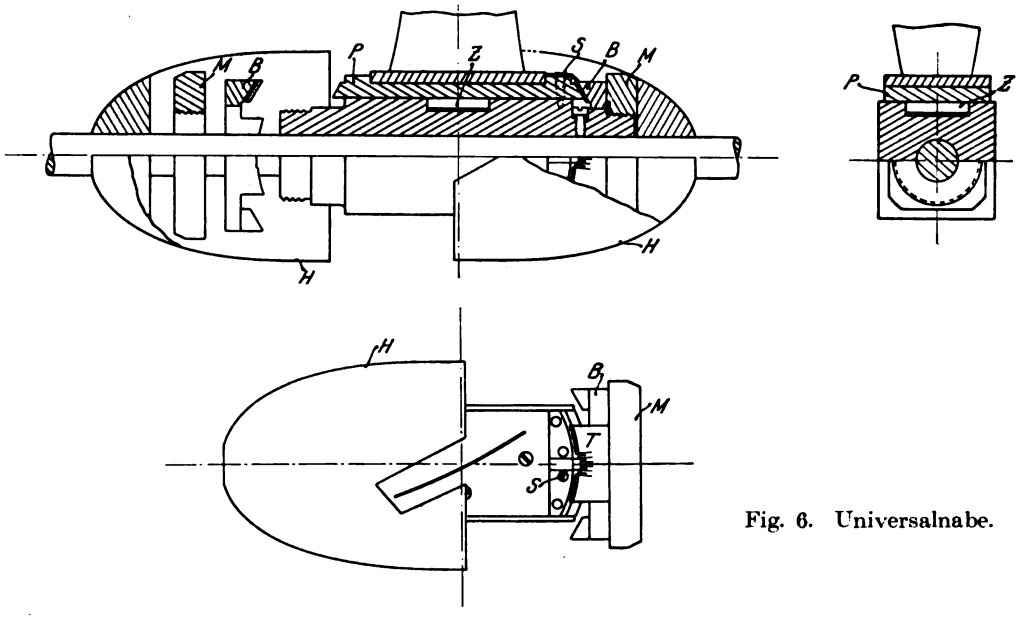


Fig. 6. Universalnabe.

Fig. 6 zeigt die bei den Messungen benutzte Universalnabe für 2- und 4-flügelige Schrauben, die ein Verdrehen der Flügel gestattet (für die 3-flügelige Schraube wurde eine besondere, im wesentlichen aber ebenso eingerichtete Nabe verwandt). Der Schraubenflügel ist auf der Platte P befestigt, die um den Zentrierungszapfen Z drehbar ist. An der Gradteilung T ist der Verstellungswinkel abzulesen. Die Platte wird am Rande durch die Befestigungsstücke B gehalten, die sich beim Anziehen der Muttern M mit ihren abgeschrägten Flächen auf die entsprechenden Konusflächen der Platte P pressen. Gegen Verdrehen ist die Platte durch die kleine Schraube S gesichert. Um die Strömung der Luft möglichst wenig zu stören, wurde die Nabe durch die übergesteckten Hülsen H eingehüllt.

II. Herstellung der Modelle und Ausführung der Versuche.

Um den Flügeln die gewünschte Form geben zu können, wurde zunächst die den sämtlichen untersuchten Schraubenformen zugrunde liegende mathematische Schraubenfläche durch eine auf einem Holzblock aufgebaute Reihe von Blechschablonen räumlich dargestellt (Fig. 7 und 8). Die einzelnen Schraubenflügel, die aus Kupferblech hergestellt sind, wurden durch Hämmern und Biegen so geformt, daß sie beim Auflegen auf die Schablonenreihe genau paßten. Die ebenen Profile mußten dabei überall die Schablonen berühren, die gewölbten nur mit den

Digitized by Google

seitlichen Kanten; die Richtigkeit der Wölbung wurde durch Aufstecken einer besonderen Wölbungsschablone B (Fig. 8, A ist die feste Schablone der Schraubenfläche) eigens geprüft. Zur Befestigung auf der Nabe waren die Flügel mit einem Fuß aus Messingblech versehen, der auf die Platte P der Universalnabe aufgeschraubt werden konnte (Fig. 6).

Bei der Ausführung der Messungen wurde zunächst für jede Schraube ein Standversuch mit verschiedenen Umdrehungszahlen vorgenommen. Diese Ausführlichkeit hatte hauptsächlich den Zweck, das richtige Funktionieren der Apparate zu kontrollieren; da nämlich beim Standversuch Schub und Drehmoment nach der Forderung des Ähnlichkeitsgesetzes proportional dem Quadrat der Tourenzahl sind, erhält man bei Auftragung der Meßresultate über einer nach dem Quadrat der Tourenzahl geteilten Abszissenachse immer eine gerade Linie, was sich natürlich verhältnismäßig leicht feststellen läßt. Außerdem diente der Standversuch in Verbindung mit der eben erwähnten Auftragung dazu, den Nullpunkt der Drehmomentwage zu bestimmen, beziehungsweise zu kontrollieren, da sich derselbe bei stillstehendem Propeller wegen der vorhandenen Reibung nicht genügend genau ermitteln läßt. Um bei der Extrapolation auf die Tourenzahl 0 keinen nennenswerten Fehler zu begehen, wurde immer ein Standversuch bei ganz niedriger Tourenzahl ausgeführt (n = 126 Umdrehungen pro Minute; in den Tabellen Seite 136 ff. sind diese Werte nicht aufgeführt, da sie sich nur wenig von 0 unterscheiden). Diese Methode der Nullpunktbestimmung hat den Vorteil, daß dabei der Leerlaufwiderstand des Getriebes von selbst eliminiert wird[1]).

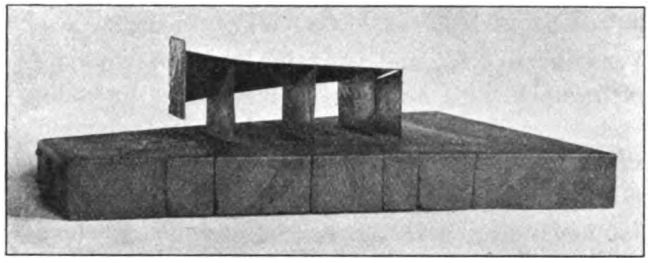


Fig. 7.

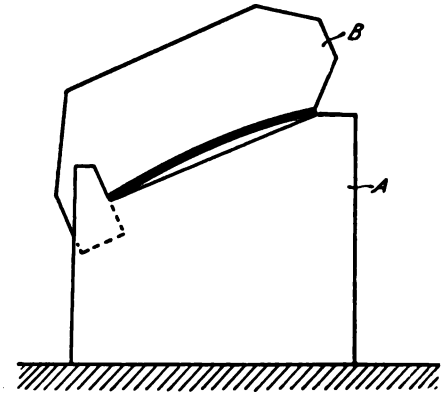


Fig. 8.

[1]) Bei der Ausführung der Standversuche stellte sich leider heraus, daß die auftretenden Kräfte zeitlich recht erheblichen Schwankungen unterworfen sind. Es wurden daher diejenigen Einstellungen der Wagen als zutreffend angesehen, bei welchen Ausschläge nach beiden Seiten ungefähr gleich häufig vorkamen. Diese Erscheinung rührt wahrscheinlich daher, daß die Luft im Innern des Meßkanales selbst zirkuliert und nicht mehr die Beruhigungseinrichtungen für den Luftstrom passiert. Infolgedessen arbeitet die Schraube nicht in ruhiger, sondern in stark turbulenter Luft. Die Standversuche können daher keinen sehr hohen Grad von Genauigkeit beanspruchen. Nach einem besonders angestellten Vergleichsversuch, bei dem die Windgeschwindigkeit allmählich auf 0 abnahm, scheinen die gemessenen Drehmomente ca. 5 % und die Schübe ca. 2 % zu niedrig zu sein. Doch kann man auch diese Angaben wegen der erwähnten Unsicherheit bei der Messung an Stand nur als rohe Schätzung betrachten. Bei den Fahrversuchen zeigten sich keinerlei derartige Erscheinungen, die Wagen, die im übrigen mit einer sehr kräftig wirkenden Öldämpfung versehen waren, spielten dabei ruhig ein.

Digitized by Google

Hatten sich beim Auftragen des Standversuches keine erheblichen Abweichungen von der durch die Theorie geforderten Gesetzmäßigkeit ergeben[1]), so wurde mit den „Fahrversuchen" begonnen. Der Propeller wurde auf eine bestimmte Tourenzahl eingestellt und ein Luftstrom von bekannter Geschwindigkeit dagegengeblasen. Nachdem Schub und Drehmoment gemessen waren, wurde die Windgeschwindigkeit erhöht und die Messung wiederholt. Dies wurde so lange fortgesetzt, bis entweder der Schub ungefähr auf 0 gesunken war, oder bis die Einrichtung der Versuchsanstalt eine weitere Erhöhung der Geschwindigkeit nicht mehr zuließ. Darauf wurde die Tourenzahl geändert und wieder in gleicher Weise vorgegangen, so daß man Schub und Drehmoment bei verschiedenen Umdrehungszahlen und Windgeschwindigkeiten erhielt. Die benutzten Wagen wurden vor Beginn und nach Beendigung der Versuche geeicht, und zwar die Drehmomentwage mittels einer an Stelle der Luftschrauben aufgesetzten Bremsscheibe und die Schubwage durch Gewichte, die mittels einer über eine leichtgehende Rolle laufenden Schnur an die Propellerwelle angehängt wurden. Diese Schubeichung wurde mit aufgesetztem Propeller vorgenommen, da das Gewicht des Propellers infolge der durch den Schub hervorgerufenen Längenänderung des zur Wage führenden Drahtes die Angaben dieser Wage beeinflußt.

III. Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse[2]).

Da Schub und Drehmoment einer Schraube von den zwei Variabeln Fahr- bzw. Windgeschwindigkeit und Tourenzahl abhängen, sind die Resultate in ihrer durch die Messungen gefundenen Form recht wenig übersichtlich. Es war daher hier ganz besonders geboten, die Resultate in dimensionsloser Form darzustellen, wobei sich eine Abhängigkeit von nur einer Größe ergibt. Als solche wurde das Verhältnis $\lambda = v/u$ von Fahrgeschwindigkeit zu Umfangsgeschwindigkeit gewählt. Dies hat gegenüber dem sonst vielfach gebräuchlichen Slipverhältnis den Vorteil, daß es eine genau definierte Größe ist, was beim Slip nur dann der Fall ist, wenn es sich um Schrauben mit konstanter Steigung handelt. Man hat diese letztere Schwierigkeit dadurch zu umgehen versucht (Bericht der englischen Versuchsanstalt in Teddington), daß man eine ideelle Steigung zugrunde legte, die gleich der Vorwärtsbewegung bei einer Umdrehung des Propellers ist, wenn die Schraube gerade den Schub 0 gibt. Diese Methode hat hauptsächlich den Nachteil, daß der Koordinatenanfangspunkt erst aus den Versuchsergebnissen bestimmt wird und daher von

[1]) Es ergab sich meistens nicht genau die von der Theorie geforderte Gerade, sondern im allgemeinen eine flach gewölbte Kurve, deren konkave Seite nach oben zeigte; diese Abweichungen sind jedoch so gering, daß sie kaum die Meßgenauigkeit überschreiten, und nur aus der Regelmäßigkeit, mit der fast stets Abweichungen in demselben Sinne sich zeigten, kann man auf ihre Echtheit schließen. Als Erklärung darf man wohl eine geringe elastische Verdrehung der Schraubenflügel ansehen, die sowohl durch Zentrifugalkräfte als auch durch den Luftdruck verursacht wird.

[2]) Bei der Bearbeitung des umfangreichen Zahlenmaterials wurde ich in weitgehendem Maße von Herrn stud. math. Karl Pohlhausen unterstützt, dem ich für diese mühevolle und zeitraubende Arbeit zu großem Dank verpflichtet bin.

Digitized by Google

der Genauigkeit der Messungen abhängt; auch liegt dabei eine gewisse Willkür vor, da Schub und Drehmoment nicht gleichzeitig 0 werden. Bei einer mathematischen Schraubenfläche z. B. sinkt der Schub bereits bei positiven, das Drehmoment dagegen erst bei negativen Werten des wirklichen Slips auf Null.

Im Nachfolgenden sind die wichtigsten in den Tabellen und Diagrammen benutzten Bezeichnungen zusammengestellt. Daraus ist auch die Bedeutung der dimensionslosen Koeffizienten für den Schub (ψ) und das Drehmoment (μ) ersichtlich.

γ/g spez. Dichte der Luft.
R Radius des Schraubenkreises.
R_i Radius der Nabe.
$\rho = \frac{R_i}{R}$
b Breite der Flügel.
i Anzahl der Flügel.
P Schub.
M Drehmoment.
v Wind-(Fahr-)geschwindigkeit.
n Zahl der Umdrehungen der Schraube pro Minute.
ω Winkelgeschwindigkeit.
$u = R\,\omega$ Umfangsgeschwindigkeit.
$\lambda = v/u$ Verhältnis von Fahrgeschwindigkeit zu Umfangsgeschwindigkeit.
ε Völligkeitsgrad (abgewickelte Flügelfläche: Kreisfläche).
$\psi = \frac{P}{\gamma/g \cdot R^2 \pi \cdot u^2}$ Schubkoeffizient.
$\mu = \frac{M}{\gamma/g \cdot R^3 \pi \cdot u^2}$ Drehmomentkoeffizient.
$\eta = \frac{P \cdot v}{M \cdot \omega} = \frac{\psi}{\mu} \cdot \lambda$ Wirkungsgrad.
$\varkappa = \frac{\lambda}{\lambda + \sqrt{\psi}}$ Belastungsmaß.
η_m maximaler theoretischer Wirkungsgrad.
ψ_1 Schubkoeffizient bezogen auf die abgewickelte Flügelfläche.
μ_1 Drehmomentkoeffizient bezogen auf die abgewickelte Flügelfläche.

Da der Fahrwind bei größeren Geschwindigkeiten nicht unbeträchtliche Kräfte auf die Aufhängungs- und Zuleitungsteile des Propellers ausübte, soweit dieselben nicht durch die S. 87 erwähnte Blechkappe geschützt waren, wurde der Widerstand dieser Teile einschließlich der Nabe (mit abgenommenen Flügeln) durch einen besonderen Versuch ermittelt — er betrug in g $3{,}70 \cdot v^2\,\gamma/g$ ($v^2\,\gamma/g$ in kg/m²) — und zu den an der Schubwage gemessenen Kräften addiert. Die in den Tabellen angegebenen Werte für P stellen also die reine Wirkung der Flügel ohne Nabe und Befestigungsteile dar.

Für die Standversuche wurden die Koeffizienten ψ und μ nicht von jeder einzelnen Messung berechnet, sondern nur ein Mittelwert, wobei die bei der Beschreibung der Versuche erwähnte Auftragung nach dem Quadrat der Tourenzahl

Digitized by Google

als Hilfsmittel zur Ausgleichung diente. In den Tabellen sind zunächst die Ergebnisse der Fahrversuche und getrennt davon die der Standversuche zusammengestellt.

Infolge eines Versehens bei der Herstellung der Modelle waren die breiten Flügel etwas zu kurz geworden, und zwar die mit ebenen Profilen um 10 mm und die mit gewölbten um 5 mm. ψ und μ in den betreffenden Tabellen sind nun unter Berücksichtigung der wirklichen Radien und Umfangsgeschwindigkeiten berechnet. Da es jedoch im Interesse der Übersichtlichkeit erwünscht war, in den Diagrammen den systematischen Aufbau der Formänderungen nicht zu durchbrechen, wurden die Größen ψ', μ' und λ' gerechnet, die angenähert die Werte wiedergeben, die man bei richtigen Abmessungen erhalten hätte. Die dimensionslosen Koeffizienten sind bekanntlich unabhängig von der wirklichen Größe der Versuchskörper, wir können uns daher die Schrauben auf den normalen Durchmesser von 50 cm vergrößert denken, ohne daß sich die zusammengehörigen Werte von ψ, μ und λ dabei ändern. Die Vergrößerung muß sich natürlich auf alle Längenabmessungen gleichmäßig erstrecken, so daß nun die Steigung und die Flügelbreite zu groß sind, aber für Abweichungen in diesen Größen läßt sich der daraus entspringende Fehler leichter abschätzen. Die zu große Steigung hat zur Folge, daß die entsprechenden Einfallswinkel der Luft erst bei größerer Fahrgeschwindigkeit erreicht werden (bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit). Man wird daher diesen Fehler durch eine Korrektur von λ am ehesten ausgleichen können. Eine eingehendere Überlegung zeigt, daß bei dem vorliegenden Steigungsverhältnis der durch eine um 4% bzw. 2% zu große Steigung verursachte Fehler angenähert ausgeglichen wird, wenn λ in $\lambda' = \lambda - 0{,}01$ bzw. $\lambda - 0{,}005$ abgeändert wird. Die unrichtige Flügelbreite läßt sich dadurch kompensieren, daß ψ und μ um 4% bzw. 2% verkleinert werden, da diese Koeffizienten ungefähr proportional der Flügelbreite sind. Diese Methode der Umrechnung ist zwar nicht ganz korrekt, aber da es sich ohnehin nur um sehr kleine Differenzen handelt, dürften die so erhaltenen Werte kaum merklich von den wahren abweichen.

In den Tabellen sind die Werte n, v, P und M und die daraus berechneten ψ, μ, λ (ev. noch ψ', μ', λ') wiedergegeben. Die letzteren, dimensionslosen Zahlen sind außerdem in den Diagrammen Fig. 18—23 dargestellt. Die Fig. 24—29 zeigen den Verlauf der Kurven für den Wirkungsgrad η. Dieser ist jedoch auf den Vorschlag von Herrn Prof. Prandtl nicht als Funktion von λ, sondern von $\varkappa = \frac{\lambda}{\lambda + \sqrt{\psi}}$ dargestellt. Soll nämlich mit einem Propeller von gegebenem Durchmesser bei einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit ein bestimmter Schub erzeugt werden, so ist damit die dimensionslose Größe

$$\varphi = \frac{P}{\gamma/g \cdot R^2 \pi \cdot v^2} = \frac{\psi}{\lambda^2}$$

gegeben. Nimmt man diese Größe φ oder eine Funktion von φ zur Abszisse für die Auftragung der Wirkungsgradkurven verschiedener Propellertypen, so hat man den Vorteil, daß die für die vorgenannte Aufgabe in Betracht kommenden Kurvenpunkte jeweils auf ein und derselben gegebenen Abszisse liegen, daß also die an dieser Stelle höchste Wirkungsgradkurve, den für die gegebenen Werte von Schub,

Digitized by Google

Geschwindigkeit und Schraubendurchmesser geeignetsten Propeller aufzeigt. Um eine bequeme Auftragung zu erhalten, bei der die beiden Nullstellen von μ (für $\lambda = 0$ und $\psi = 0$) bei 0 und 1 liegen, wurde als Funktion von φ die obenerwähnte Größe $\varkappa = \frac{1}{1 + \sqrt{\varphi}}$ gewählt, die man etwa als Belastungsmaß bezeichnen kann.

Aus theoretischen Überlegungen läßt sich zeigen, daß der Wirkungsgrad eines Propellers, der bei gegebener Fahrgeschwindigkeit und gegebenem Durchmesser einen gegebenen Schub liefern soll, den Wert

$$\eta_m = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 2\varphi}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 2\left(\frac{1}{\varkappa} - 1\right)^2}}$$

nicht überschreiten kann. Die Kurve für η_m ist in den Diagrammen mit eingezeichnet, so daß man aus dieser Zusammenstellung ein übersichtliches Bild von der Güte der einzelnen Luftschrauben gewinnt, indem man sofort ersieht, wieweit der Wirkungsgrad in einem bestimmten Fall dem maximal überhaupt erreichbaren sich nähert. Die günstigsten Wirkungsgrade liegen meist bei einem Verdrehungswinkel β von ca. 4° bis 5°. Würde λ dabei gerade den Wert 0,255 haben, der dem Slip Null für die zugrunde gelegte reine Schraubenfläche entspricht, so würde der

Ebene Profile.

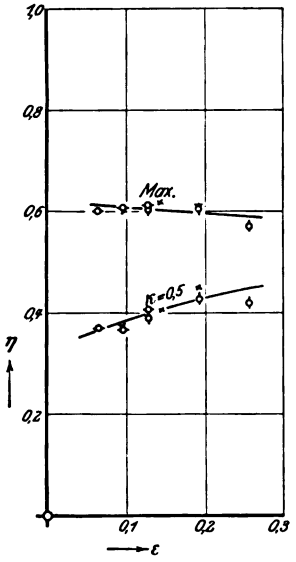


Fig. 9.

Gewölbte Profile.

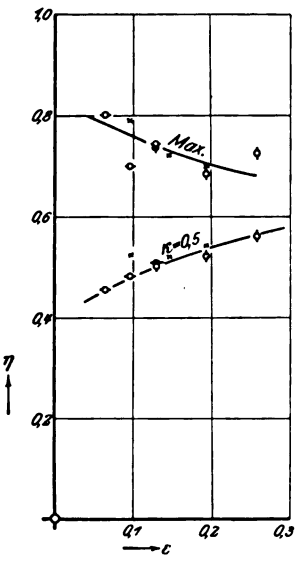


Fig. 10.

—○— 3 cm breite Flügel
—×— 4,5 cm breite Flügel
—◇— 6 cm breite Flügel

Fig. 9 und 10. Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Völligkeitsgrad.

Einfallswinkel der Luft ebenfalls 4° bis 5° betragen. Da die günstigsten Wirkungsgrade aber bei etwas höheren Werten von λ liegen, so ist der Einfallswinkel etwas kleiner, und zwar nicht konstant für jedes Flügelelement, sondern von innen nach außen zunehmend.

Für stark belastete Schrauben von beschränktem Durchmesser und geringer Fahrgeschwindigkeit (kleines $\varkappa$) sind in extremen Fällen negative Verstellungswinkel günstiger, so daß sich hier eine Abnahme der Steigung (und des Einfallswinkels) nach außen hin als vorteilhaft erweist. Da durch die Verdrehung der Schraubenflügel auch die mittlere Steigung geändert wird, so kann die eben erwähnte Erscheinung möglicherweise auch so interpretiert werden, daß für stark

Digitized by Google

belastete Schrauben ein kleineres Steigungsverhältnis H/D günstiger ist. Der Einfluß des Völligkeitsgrades ε (Verhältnis der abgewickelten Flügelfläche zur Schraubenkreisfläche) ist aus den Diagrammen 9 und 10 zu ersehen. Hier ist das Maximum des Wirkungsgrades für die jeweils günstigste Winkelstellung in Abhängigkeit vom Völligkeitsgrad aufgetragen. Für die gewölbten Profile ist daraus eine beträchtliche Abnahme des Wirkungsgrades zu ersehen. Für die ebenen Profile, deren Wirkungsgrad ohnehin schon wesentlich geringer ist, tritt der Einfluß des Völligkeitsgrades hier kaum noch merklich in Erscheinung. Um auch für stark belastete Schrauben die Verhältnisse besser zu übersehen, ist in diesen Diagrammen auch für ein verhältnismäßig niedriges x (0,5) der Wirkungsgrad für die günstigste Winkelstellung eingetragen. Auch hier hat sich die Erscheinung umgekehrt, indem jetzt ein hoher Völligkeitsgrad günstiger ist. Man kann das vielleicht darauf zurückführen, daß für ein bestimmtes x mit wachsender Völligkeit λ sowohl wie ψ größer werden, und daß dadurch günstigere Einfallswinkel erzielt werden.

Um einen besseren Einblick in die Wirkung der Flügelbreite und der Flügelzahl zu gewinnen, wurden für die Propeller mit $\beta = 3^0$ Verstellungswinkel die Werte ψ_1 und μ_1 zusammengestellt, deren Berechnung folgende, von Herrn Prof. Prandtl stammende Überlegung zugrunde liegt[1]). Ein Flügelelement von der Breite b und der Länge dr, das sich im Abstand r von der Achse befindet, liefert zum Schub einen Beitrag $dP = k \cdot b \cdot \gamma/g\,(v^2 + u^2\,(r/R)^2)\,dr$, da das Quadrat der Relativgeschwindigkeit des betreffenden Elementes gegen die Luft $v^2 + u^2\,(r/R)^2$ ist (vergleiche auch die Ableitungen im folgenden Kapitel). k ist dabei ein dimensionsloser Zahlenfaktor, der von der Gestalt und Stellung des Flügelelements abhängt. ψ_1 ist nun ein Mittelwert für k, der sich aus der Gleichung bestimmt

$$\psi_1 = \frac{P}{\frac{\gamma}{g} \cdot i \int b \left(v^2 + u^2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) dr},$$

wobei i die Anzahl der Flügel bezeichnet.

Durch eine einfache Umformung erhalten wir

$$\psi_1 = \frac{\psi}{\lambda^2 \frac{F}{F_0} + \frac{1}{2} \frac{J}{J_0}},$$

wobei F die gesamte abgewickelte Fläche der Schraubenflügel und J ihr geometrisches Trägheitsmoment bezogen auf die Achse bezeichnet, während F_0 die Fläche und J_0 das polare Trägheitsmoment des Schraubenkreises sind ($r^2 \pi$ bezw. $\frac{r^4 \pi}{2}$).

Ganz entsprechend ist der Koeffizient μ_1 für das Drehmoment definiert

$$\mu_1 = \frac{M}{\frac{\gamma}{g} i \int b\, r \left(v^2 + u^2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) dr},$$

[1]) Für den gerade vorliegenden Zweck hätte es genügt, die Koeffizienten ψ und μ durch den Völligkeitsgrad zu dividieren, doch wurden die Koeffizienten ψ_1 und μ_1 so definiert, daß sie auch einen Vergleich bei Schraubenflügeln mit anderen als rechteckigen Umrißformen gestatten.

Digitized by Google

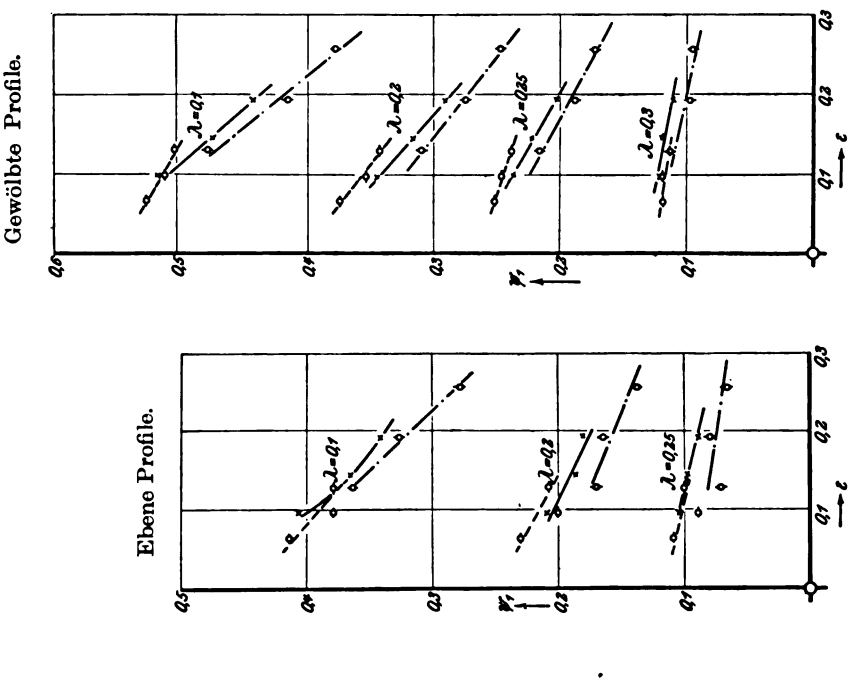


Fig. 11 u. 12. Schubkoeffizienten der Schrauben bezogen auf die abgewickelte Flügelfläche in Abhängigkeit vom Völligkeitsgrad.

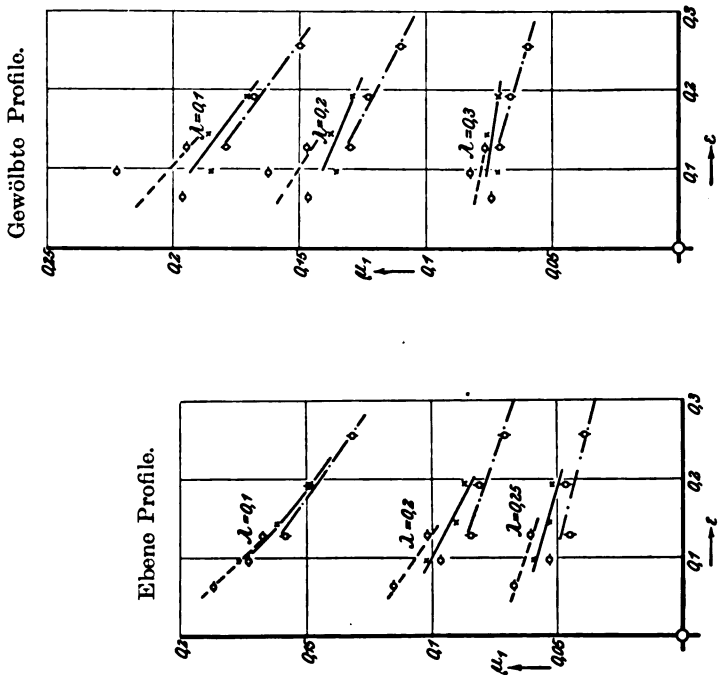


Fig. 13 u. 14. Drehmomentkoeffizienten der Schrauben bezogen auf die abgewickelte Flügelfläche in Abhängigkeit vom Völligkeitsgrad.

Digitized by Google

was sich umformen läßt zu

$$\mu_1 = \frac{\mu}{\frac{2}{3}\lambda^2 \frac{S}{S_0} + \frac{2}{5}\frac{T}{T_0}},$$

wobei S bzw. S_0 die statischen Momente und T bzw. T_0 die Momente 3. Ordnung der Flügelflächen bzw. des Schraubenkreises bedeuten.

Für die vorliegenden Schrauben ergeben sich durch Einsetzen der betreffenden Abmessungen die Werte

$$\frac{F}{F_0} = i \cdot \frac{b}{R} \cdot 0{,}267,$$

$$\frac{1}{2}\frac{J}{J_0} = i \cdot \frac{b}{R} \cdot 0{,}105,$$

$$\frac{2}{3}\frac{S}{S_0} = i \cdot \frac{b}{R} \cdot 0{,}155,$$

$$\frac{2}{5}\frac{T}{T_0} = i \cdot \frac{b}{R} \cdot 0{,}0795.$$

Die für ψ_1 und μ_1 gefundenen Zahlen sind in den Diagrammen Fig. 11—14 für einige bestimmte λ in Abhängigkeit von dem Völligkeitsgrad $\frac{F}{F_0}$ aufgetragen. Man ersieht daraus, daß bei zunehmender Völligkeit der Koeffizient des Schubes sowohl wie auch der des Drehmomentes etwas kleiner wird, besonders bemerkenswert ist dabei, daß es anscheinend nicht ganz gleichgültig ist, ob man die Erhöhung des Völligkeitsgrades durch Verbreiterung der Flügel oder durch Erhöhung der Flügelzahl bewirkt. Im letzteren Falle ist die Verminderung der Koeffizienten im allgemeinen etwas geringer als im ersteren.

IV. Vergleich zwischen Schraubenflügeln und Tragflächen.

Die Luftbewegung um ein Element eines Schraubenflügels ist im wesentlichen genau dieselbe wie bei den Elementen einer Tragfläche. Es liegt daher nahe, zu versuchen, ob und mit welcher Genauigkeit es möglich ist, Schub und Drehmoment aus den Auftriebs- und Widerstandskoeffizienten für Tragflächen von demselben Profil zu berechnen. Der hauptsächlichste Unterschied zwischen den Vorgängen an einem Schraubenflügel und an einer Tragfläche besteht darin, daß bei ersterem die Geschwindigkeit nach den Flügelspitzen hin zunimmt, so daß die äußeren Teile des Flügels einen wesentlich höheren Beitrag zu den Luftwiderstandskräften liefern als die inneren. Die schädlichen Einflüsse der an den Flügelspitzen auftretenden Wirbel werden daher wegen ihrer geringeren Entfernung von den wirksamsten Teilen des Flügels verhältnismäßig stärker ins Gewicht fallen, als dies bei den entsprechenden Wirbeln an Tragflächenenden von gleichen Abmessungen der Fall ist. Aus dieser Überlegung heraus schien es zweckmäßig, bei dieser ersten Vergleichsrechnung nicht von einer bestimmten Tragfläche auszugehen, sondern umgekehrt zu fragen, welches Seitenverhältnis die der Rechnung zugrunde liegende

Digitized by Google

Tragfläche haben muß, damit sich aus ihren Auftriebs- und Widerstandskoeffizienten Schub und Drehmoment der Schraube möglichst richtig berechnet. (Bekanntlich hängen die Luftkräfte in hohem Maße vom Seitenverhältnis ab.)

Die theoretische Voraussetzung für die folgende Rechnung ist die, daß die Stromlinien der der Schraube zufließenden Luft keine andere Ablenkung erfahren als es bei einer Tragfläche von gleichem Profil und von demselben Anstellwinkel der Fall ist. Da die Geschwindigkeit eines Flügelelementes im Abstand r von der Propellerachse sich aus den beiden Komponenten: Fortschreitungsgeschwindigkeit v und Rotationsgeschwindigkeit $r\omega$ zusammensetzt, so ist der Anstellwinkel von der Richtung dieser Geschwindigkeit aus zu rechnen (Fig. 15). Um die Rechnung möglichst einfach zu gestalten, wurde die Untersuchung nur auf den Fall $\lambda = 0{,}255$ erstreckt, bei welchem die Richtung der Flügelgeschwindigkeit in die den Flügelformen zugrunde gelegte mathematische Schraubenfläche fällt. Hier ist nämlich der Anstellwinkel α für alle Flügelelemente konstant, nämlich gleich dem Verdrehungswinkel β ($-3^0, 0^0, +3^0, +5^0$). Für den Winkel φ, den die Flügelgeschwindigkeit w mit der Schraubenachse einschließt, besteht die Beziehung

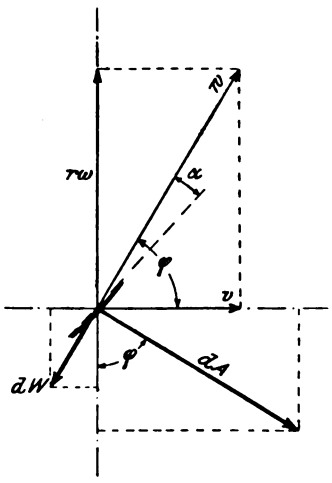


Fig. 15.

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{r\,\omega}{v}.$$

Für den absoluten Betrag dieser Geschwindigkeit erhalten wir

$$w = \sqrt{(r\,\omega)^2 + v^2}.$$

Da der Widerstand $dW = \zeta_W \cdot w^2 \cdot \gamma/g\ b\ dr$ eines Flügelelementes $(b \cdot dr)$ entgegengesetzt der Geschwindigkeit w wirkt und der Auftrieb $dA = \zeta_A \cdot w^2 \cdot \gamma/g\ b\ dr$ senkrecht dazu, so liefern diese beiden Kräfte für den Schub die Beträge

$$dP = dA \cdot \sin\varphi - dW \cdot \cos\varphi$$

und für das Moment

$$dM = r\,[dA \cdot \cos\varphi + dW \cdot \sin\varphi].$$

Durch Einsetzen obiger Werte für dA und dW, Integration über die Länge des Schraubenflügels (r) und Multiplikation mit der Anzahl i der Flügel erhalten wir P und M und daraus durch Division mit $\gamma/g\ R^2\,\pi \cdot u^2$ bzw. $\gamma/g\ R^3\,\pi \cdot u^2$,

$$\psi = i \cdot \frac{b}{R}(a\,\zeta_A - c\,\zeta_W),$$

$$\mu = i \cdot \frac{b}{R}(e\,\zeta_A + f\,\zeta_W),$$

wobei

$$a = \frac{1}{3\pi}\left[\sqrt{1+\lambda^2}^3 - \sqrt{\rho^2+\lambda^2}^3\right],$$

$$c = \frac{1}{2\pi}\left[\sqrt{1+\lambda^2} - \rho\sqrt{\rho^2+\lambda^2} + \lambda^2 \ln\frac{1+\sqrt{1+\lambda^2}}{\rho+\sqrt{\rho^2+\lambda^2}}\right],$$

Digitized by Google

$$e = \frac{\lambda}{3\pi}\left[\sqrt{1+\lambda^2}^3 - \sqrt{\rho^2+\lambda^2}^3\right] = a \cdot \lambda,$$

$$f = \frac{1}{8\pi}\left[(2+\lambda^2)\sqrt{1+\lambda^2} - \rho\,(2\rho^2+\lambda^2)\sqrt{\rho^2+\lambda^2} - \lambda^4 \ln \frac{1+\sqrt{1+\lambda^2}}{\rho+\sqrt{\rho^2+\lambda^2}}\right].$$

ρ ist das Verhältnis des Nabenradius zum Außenradius der Schraube.
Für die untersuchten Flügelformen ($\lambda = 0{,}255$, $\rho = 0{,}16$) ist

$$a = 0{,}114 \qquad e = 0{,}0291$$
$$c = 0{,}0439 \qquad f = 0{,}084.$$

Aus den gemessenen ψ- und μ-Werten lassen sich mittels dieser Gleichungen ζ_A und ζ_W berechnen.

Die Werte für ζ_W, die sich ergeben, sind ungefähr in dem Bereich der für Tragflächen gefundenen. Da sie auf die ψ- und μ-Werte im allgemeinen nur von untergeordneter Bedeutung sind, lassen sie sich naturgemäß nur mit geringer Genauigkeit daraus bestimmen. Es genügt aber aus dem gleichen Grunde für praktische Zwecke vollkommen, wenn man sie zu ca. 0,01—0,03 für ebene bzw. 0,02 bis 0,035 für gewölbte Profile annimmt (die kleineren Werte etwa für $\alpha = 0^0$, die größeren für $\alpha = 5^0$). ζ_A dagegen, das für die ψ- und μ-Werte von ausschlaggebender Bedeutung ist, zeigt eine charakteristische Abhängigkeit von der Flügelbreite und Flügelzahl. Die gefundenen Werte sind in den Diagrammen 16 und 17 zusammengestellt, doch ist dazu zu bemerken, daß der Übersichtlichkeit halber die Kurven etwas auf der Abszissenachse verschoben sind, so daß sie sämtlich durch einen gemeinsamen Punkt gehen. Infolge der elastischen Verdrehung der Schraubenflügel und zum Teil auch infolge von Ungenauigkeiten in der Herstellung ist nämlich der jeweilige Wert des Einfallwinkels α etwas unsicher, und deshalb schien die angewandte Verschiebung wohl zulässig. Die Einflüsse der Flügelzahl lassen sich ungefähr in gleicher Weise erklären wie die gegenseitige Störung von Tragflächen bei Doppeldeckern. Es wird daher zweckmäßig sein, die Flügelzahl nach Möglichkeit getrennt von der Flügelbreite zu behandeln. Zum Vergleich wurden deshalb Tragflächen herangezogen, deren Auftriebskurven möglichst gut mit denen der 2-flügeligen Schrauben übereinstimmen. Außerdem sollte die Länge dieser Tragflächen in allen Fällen dieselbe und ihre Tiefe gleich der Flügelbreite sein. Selbstverständlich mußte auch die Wölbung übereinstimmen. Es ergibt sich, daß man diese Forderungen einigermaßen erfüllt, wenn man als Länge der Vergleichsfläche ungefähr $^2/_3$R annimmt. Die betreffenden Auftriebskurven sind in die Diagramme mit eingezeichnet (nach den Messungen von O. Föppl, Jahrb. d. M. St. G. 1910/11, durch Interpolation gefunden).

Die geschilderte Methode der Schraubenberechnung ist zwar nur eine Annäherungsmethode und kann als solche naturgemäß keinen sehr hohen Grad von Genauigkeit beanspruchen. Aber bei Benützung der experimentell gefundenen Zahlen dürfte das Verfahren doch zu praktisch brauchbaren Ergebnissen führen, besonders wenn es sich darum handelt, die zur Erzielung eines bestimmten Schubes erforderlichen Abmessungen der Flügelprofile zu ermitteln, da hierfür andere Methoden kaum anwendbar sind.

Digitized by Google

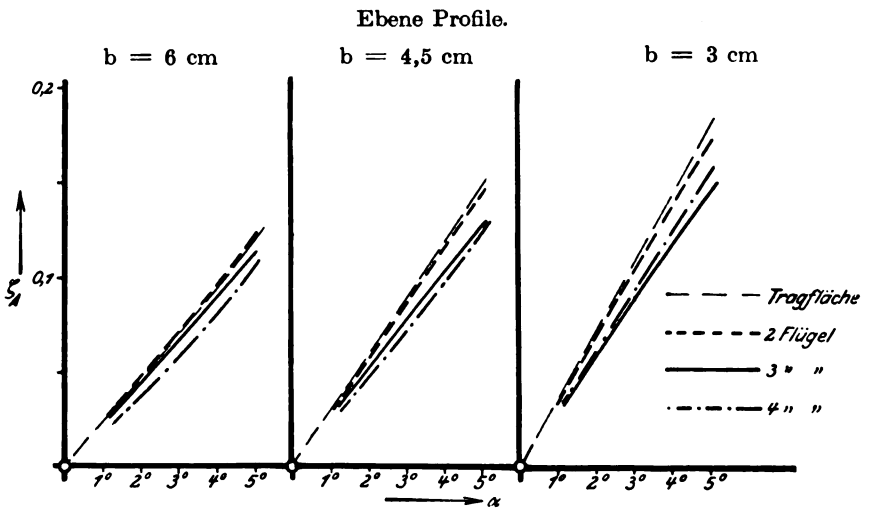


Fig. 16.

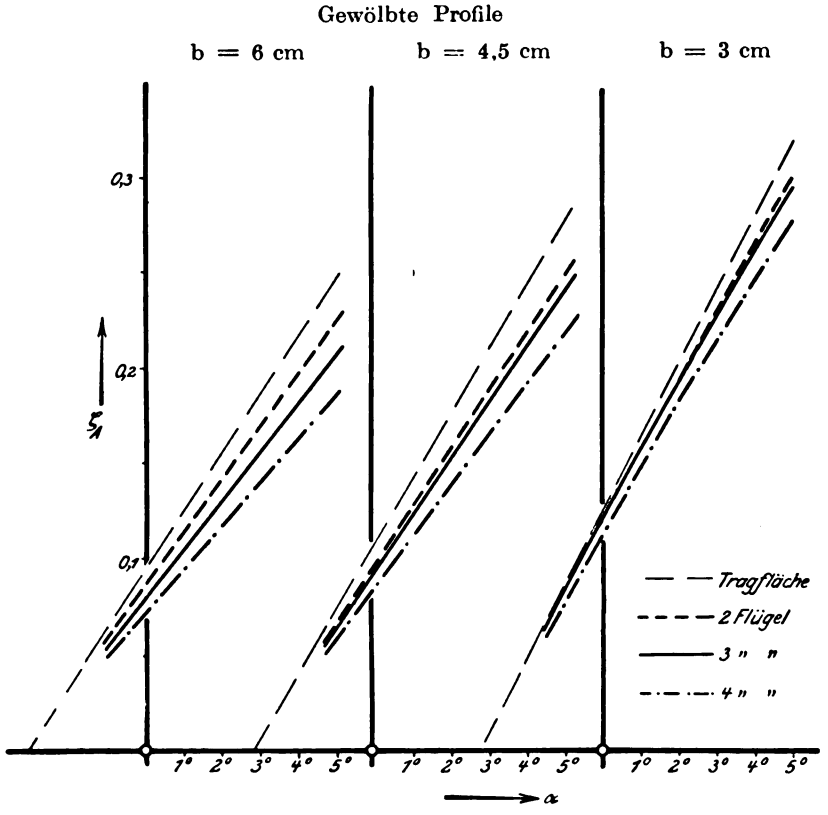


Fig. 17.

Digitized by Google

V. Tabellen und Diagramme.

I. Versuchsergebnisse für Schrauben mit ebenem, 6 cm breitem Profil.

A. Vierflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 4 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = -3^0$; Barometerstand B = 752 mm; Temperatur T = 21°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
816	3,58	70	680	7,6	3,09	0,175	7,3	2,96	0,165
816	4,93	− 26	120	− 2,8	0,19	0,240	− 2,7	0,18	0,230
1020	3,59	191	1440	13,3	4,19	0,140	12,8	4,03	0,130
1020	5,52	32	530	2,2	1,54	0,214	2,1	1,48	0,204
1020	6,03	− 20	280	− 1,4	0,41	0,236	− 1,3	0,40	0,226
1306	3,59	417	2850	17,82	5,11	0,110	17,10	4,90	0,099
1306	5,55	229	1840	9,79	3,28	0,170	9,40	3,14	0,160
1306	6,56	113	1180	4,85	2,12	0,201	4,65	2,04	0,190
1306	7,47	7	630	0,53	1,12	0,228	0,51	1,08	0,218
1428	3,66	535	3560	19,00	5,30	0,102	18,23	5,09	0,092
1428	5,56	332	2500	11,75	3,72	0,155	11,27	3,57	0,145
1428	7,04	156	1540	5,50	2,29	0,196	5,28	2,20	0,186
1428	8,31	− 1	630	− 0,05	0,93	0,232	− 0,04	0,89	0,222

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 4 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = 0^0$; Barometerstand B = 752 mm; Temperatur T = 16°—19,5°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
816	3,54	136	1170	14,7	5,26	0,173	14,1	5,06	0,163
816	5,50	− 4	230	− 0,5	1,02	0,268	− 0,4	0,98	0,258
1020	3,57	287	2210	19,8	6,39	0,140	19,0	6,14	0,130
1020	5,51	124	1180	8,6	3,42	0,215	8,3	3,29	0,205
1020	6,53	35	600	2,4	1,73	0,255	2,3	1,67	0,245
1224	3,53	480	3560	23,1	7,13	0,115	22,2	6,86	0,105
1224	5,52	300	2390	14,41	4,79	0,180	13,85	4,60	0,170
1224	7,00	140	1490	6,74	2,99	0,228	6,48	2,88	0,218
1224	8,26	− 11	530	− 0,58	1,03	0,269	− 0,55	0,99	0,259
1428	3,66	700	5160	24,75	7,63	0,103	23,75	7,34	0,093
1428	5,56	520	4010	18,42	5,91	0,155	17,7	5,69	0,145
1428	7,02	332	2850	11,74	4,21	0,196	11,3	4,05	0,186
1428	8,29	175	1890	6,19	2,79	0,231	5,95	2,69	0,221
1428	9,06	82	1290	2,91	1,76	0,253	2,80	1,69	0,243

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 4 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = 3^0$; Barometerstand B = 752 mm; Temperatur T = 16^0—$19{,}5^0$.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
816	3,54	197	1690	21,2	7,59	0,173	20,3	7,28	0,163
816	4,93	105	980	11,3	4,42	0,240	10,8	4,25	0,230
816	6,01	14	380	1,5	1,70	0,294	1,4	1,63	0,284
1020	3,60	388	3150	2,69	9,11	0,141	25,8	8,75	0,131
1020	5,51	218	2040	15,1	5,88	0,215	14,5	5,65	0,205
1020	6,99	87	1060	6,1	3,06	0,273	5,8	2,94	0,263
1020	7,45	41	680	2,8	1,97	0,291	2,7	1,89	0,281
1224	3,66	611	5030	29,4	10,3	0,119	28,2	9,89	0,109
1224	5,55	423	3660	20,4	7,33	0,181	19,6	7,04	0,171
1224	7,01	274	2550	13,18	5,12	0,228	12,65	4,92	0,218
1224	8,26	130	1540	6,30	3,09	0,269	6,05	2,96	0,259
1224	9,06	41	830	1,93	1,68	0,295	1,85	1,61	0,285
1428	5,58	694	5940	24,5	8,72	0,156	23,5	8,37	0,146
1428	7,05	521	4560	18,43	6,72	0,197	17,7	6,45	0,187
1428	8,30	359	3460	12,68	5,10	0,232	12,17	4,90	0,222
1428	9,07	266	2550	9,4	3,76	0,253	9,03	3,61	0,243

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 4 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = 5^0$; Barometerstand B = 748,5 mm; Temperatur T = 15^0

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm/g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
816	3,57	236	2220	25,4	9.91	0,174	24,4	9,51	0,164
816	4,91	141	1460	15,3	6,73	0,239	14,7	6,32	0,230
816	6,52	19	500	2,0	2,26	0,318	2,0	2,17	0,308
1020	3,61	461	4250	31,9	12,20	0,141	30,6	11,72	0,131
1020	5,51	282	2730	19,5	7,82	0,215	18,7	7,50	0,205
1020	6,99	163	1820	11,3	5,21	0,273	10,8	5,05	0,263
1020	8,25	36	750	2,5	2,17	0,322	2,4	2,09	0,312
1224	3,68	707	6310	33,7	12,59	0,120	32,35	12,09	0,110
1224	5,55	555	5000	26,5	9,94	0,181	25,45	9,54	0,171
1224	7,01	400	3840	19,2	7,63	0,229	18,44	7,33	0,219
1224	8,27	262	2780	12,55	5,54	0,270	12,05	5,32	0,260
1224	9,06	179	2020	8,59	4,40	0,295	8,25	4,23	0,285
1327	3,70	850	7740	34,9	13,2	0,111	33,55	12,68	0,101
1327	5,56	680	6160	27,1	10,50	0,168	26,0	10,1	0,158
1327	7,03	499	4800	20,45	8,19	0,212	19,62	7,85	0,202
1327	8,27	372	3740	14,9	6,39	0,249	14,3	6,14	0,239
1327	9,06	273	2930	11,2	4,98	0,273	10,75	4,79	0,263

Digitized by Google

B. Dreiflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite B = 6 cm; 3 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = -3^0$; Barometerstand 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
816	3,54	62	550	6,8	2,50	0,173	6,5	2,40	0,163
816	4,93	− 21	70	− 2,3	0,34	0,240	− 2,2	0,33	0,230
1020	3.56	170	1210	11,8	3,50	0,139	11,4	3,36	0,129
1020	5,52	29	400	2,1	1,16	0,216	2.0	1,11	0,205
1275	3,61	325	2170	14,40	4,04	0,113	13,82	3,88	0,103
1275	5,53	182	1410	8,07	2,61	0,173	6,75	2,53	0,163
1275	7,02	43	600	1,91	1,12	0,219	1,83	1,08	0,209
1428	3,63	461	3030	16,30	4,50	0,101	15,65	4,32	0,091
1428	5,54	292	2070	10,32	3,07	0,155	9,90	2,95	0,144
1428	7,03	140	1310	4,95	1,94	0,197	4,75	1,86	0,187
1428	8,30	0	500	0,00	0,75	0,232	0,00	0,72	0,222

Ebenes Profil; Breite B = 6 cm; 3 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = 0^0$; Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
816	3,56	120	910	13,1	4,10	0,174	12,6	3,94	0,164
816	5,51	− 2	180	− 0,2	0,80	0,268	− 0,2	0,77	0,258
1020	3,58	257	1920	17,9	2,77	0,139	17,2	5,35	0,129
1020	5.51	108	960	7,6	5,56	0,215	7,3	2,68	0,205
1020	7,02	− 9	200	− 0,6	0,58	0,275	− 0,6	0,56	0,265
1224	3,64	409	3030	19,80	6,12	0,119	19,00	5,87	0,109
1224	5,54	260	2020	12,61	4,06	0,181	12,10	3,90	0,171
1224	7,04	127	1210	6,30	2,44	0,229	6,05	2,34	0,219
1224	8,30	5	400	0.24	0,81	0,271	0,22	0.78	0,260
1428	3,68	617	4540	22,10	6,72	0,103	21,20	6,45	0,093
1428	5,57	449	3380	15,84	5,01	0,156	15,20	4,81	0,146
1428	7,04	297	2420	10,33	3,60	0,197	9,92	3,46	0,187
1428	8,32	157	1560	5,57	2,33	0,232	5,35	2,24	0,222
1428	9,14	69	960	2,44	1,42	0,255	2,34	1,36	0,245

Digitized by Google

Ebenes Profil, Breite b = 6 cm; 3 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = 3^0$; Barometerstand B = 745 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
816	3,56	168	1440	18,2	6,51	0,174	17,5	6,25	0,164
816	4,92	84	840	9,1	3.82	0,240	8,7	3,67	0,230
816	6,56	− 18	500	− 1,9	0,23	0,320	− 1,8	0,22	0,310
1020	3,60	330	2750	23,0	8,00	0,141	22,1	7,67	0,131
1020	5,54	192	1690	13,4	4,90	0,216	12,8	4,70	0,206
1020	7,06	52	910	3,6	2.64	0,276	3,5	2,54	0,298
1020	7,89	4	300	0,3	0,88	0,308	0,3	0,85	0,266
1224	3,65	536	4320	26,00	8,70	0,119	24,95	8,35	0,109
1224	5,56	373	3160	18,10	6,38	0,181	17,38	6,13	0,171
1224	7,04	237	2220	11,50	4,46	0,229	11,02	4,28	0,219
1224	8,30	120	1290	5,87	2,60	0,271	5,63	2,49	0,260
1224	9,12	43	730	2.07	1,48	0,297	1,99	1,42	0,287
1428	3,70	777	6340	27,50	9,40	0,103	26,40	9,02	0,093
1428	5,59	596	5020	21,30	7,44	0,156	20,45	7,14	0,146
1428	7,06	447	3960	15,90	5,88	0,197	15,25	5,65	0,187
1428	8,33	304	2950	10,82	4,39	0,233	10,40	4,21	0,223
1428	9,13	231	2300	8,22	3,39	0,255	7,89	3,25	0,245

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 3 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = 5^0$; Barometerstand B = 745 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
816	3,58	199	1840	21,9	8,41	0,175	21,0	8,06	0,165
816	5,54	77	880	8,5	4,04	0,270	8,1	3,88	0,260
816	6,59	19	430	2,1	1,96	0,321	2,0	1,88	0,311
1020	3,63	380	3380	26,9	9,90	0,142	25,8	9,50	0,132
1020	5,56	247	2300	17,4	6,71	0,217	16,7	6,45	0,207
1020	7,06	127	1360	8,9	4,00	0,276	8,6	3,82	0,266
1020	8,35	− 23	530	− 1,6	1,55	0,326	− 1,5	1,49	0,316
1224	3,68	593	5330	29,00	10,85	0,120	27,80	10,40	0,110
1224	5,60	449	4010	21,90	8,19	0,182	21,00	7,85	0,172
1224	7,10	303	2950	14,80	6,00	0,231	14,20	5,76	0,221
1224	8,35	191	1940	9,32	3,96	0,272	8,95	3,80	0,262
1224	9,18	116	1390	5,70	2,84	0,299	5,47	2,72	0,289
1428	3,74	841	7400	30,40	11,09	0,104	29,20	10,64	0,094
1428	5,63	680	6140	24,80	9,21	0,157	23,80	8,85	0,147
1428	7,11	531	4920	19,20	7,39	0,199	18,30	7,09	0,189
1428	8,39	398	3920	14,40	5,88	0,234	13,90	5,65	0,224
1428	9,20	315	3200	11,40	4,81	0,257	10,93	4,61	0,247

Digitized by Google

C. Zweiflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 2 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = -3^0$; Barometerstand B = 745 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
816	3,55	44	400	4,8	1,84	0,173	4,6	1,77	0,163
816	4,94	− 18	50	− 2,0	0.23	0,241	− 1,9	0,22	0,231
1020	3,58	123	860	8,6	2,50	0,140	8,2	2,40	0,130
1020	5,52	16	300	1,2	0,89	0,215	1,1	0,85	0,205
1224	3,59	228	1460	10.99	2,98	0.117	10,54	2,86	0,107
1224	5.53	100	860	4,85	1,74	0,180	4,68	1,67	0,170
1224	7,05	4	300	0,17	0,62	0,230	0,17	0,59	0,220
1428	3,60	351	2270	12,82	3,40	0,101	12,32	3.26	0,090
1428	5,55	207	1770	7,44	2,65	0,155	7,14	2,55	0,145
1428	7,05	93	860	3,34	1,27	0,197	3,21	1,22	0,187
1428	7,91	25	500	0,91	0,75	0,221	0,88	0,72	0,211

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 2 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = 0^0$; Barometerstand B = 745 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
816	3,55	75	650	8,3	3,00	0,173	7,9	2,88	0,163
816	5.53	− 9	80	− 1.0	0,35	0,260	− 1,0	0,33	0,250
1020	3,56	175	1260	12,3	3,70	0,139	11,8	3,55	0,129
1020	5,54	69	650	4.8	1,92	0,216	4.6	1,85	0,206
1020	6,57	8	300	0,6	0,88	0,257	0,6	0,85	0,247
1224	3,60	296	2120	14,60	4,32	0,117	13,99	4.15	0,107
1224	5,55	179	1390	8,75	2.84	0,181	8,40	2,72	0,171
1224	7,05	77	810	3,77	1,64	0,230	3,62	1,57	0,219
1224	7,50	46	550	2,24	1,13	0,244	2,15	1,08	0,234
1428	3,64	450	3180	16,20	4,76	0,102	15,55	4,56	0,092
1428	5,56	308	2320	11,05	3,47	0,155	10,60	3,33	0,145
1428	7,06	198	1610	7,09	2,43	0,197	6,80	2,33	0,187
1428	8,32	97	1010	3,46	1,57	0,232	3,32	1,51	0,222
1428	9,13	37	610	0,99	0,91	0,255	0,95	0,87	0,245

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 2 Flügel (Radius R = 24 mm); Verstellungswinkel $\beta = 3^0$; Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
816	3,57	118	960	12,8	4,39	0,174	12,3	4,22	0,164
816	5,53	27	350	2,9	1,62	0,270	2,8	1,56	0,260
1020	3,60	243	1970	17,1	5,74	0,141	16,4	5,50	0,130
1020	5,54	137	1210	9,6	3,54	0,217	9,2	3,40	0,206
1020	7,03	46	610	3,2	1,77	0,274	3,1	1,70	0,264
1224	3,62	388	3030	18,65	6,19	0,118	17,90	5,94	0,108
1224	5,56	268	2220	12,90	4,53	0,181	12,38	4,35	0,171
1224	7,09	153	1510	7,43	3,09	0,231	7,13	2,96	0,221
1224	8,33	75	860	3,64	1,74	0,271	3,49	1,67	0,261
1224	9,14	19	450	0,92	0,09	0,298	0,88	0,88	0,288
1428	3,66	563	4390	20,20	6,58	0,104	19,40	6,32	0,094
1428	5,59	441	3530	15,82	5,30	0,156	15,19	5,09	0,146
1428	7,06	308	2570	11,10	3,85	0,197	10,60	3,70	0,187
1428	8,35	201	1820	7,60	2,72	0,233	6,82	2,61	0,223
1428	9,15	145	1460	5,38	2,19	0,256	5,17	2,10	0,246

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm; 2 Flügel (Radius R = 24 cm); Verstellungswinkel $\beta = 5^0$; Barometerstand 748,5 mm; Temperatur T = 15°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
816	3,54	149	1310	16,0	5,84	0,175	15,4	5,60	0,165
816	5,48	56	610	6,0	2,70	0,267	5,8	2,59	0,257
1020	3,57	286	2520	19,8	7,23	0,140	19,0	6,95	0,130
1020	5,50	169	1620	11,6	4,64	0,215	11,2	4,45	0,205
1020	6,98	82	910	5,7	2,61	0,273	5,5	2,51	0,263
1020	8,25	18	350	1,2	1,02	0,322	1,2	0,98	0,312
1224	3,62	445	3840	21,4	7,65	0,118	20,55	7,35	0,108
1224	5,53	342	2925	16,35	5,83	0,180	15,70	5,60	0,170
1224	7,00	229	2120	10,95	4,22	0,228	10,50	4,05	0,218
1224	8,26	131	1360	6,28	2,72	0,269	6,04	2,61	0,259
1224	9,05	72	910	3,42	1,82	0,295	3,28	1,75	0,285
1428	3,65	642	5450	22,70	7,99	0,105	21,80	7,66	0,095
1428	5,55	523	4540	18,50	6,63	0,155	17,75	6,36	0,145
1428	7,01	400	3580	14,15	5,25	0,196	13,59	5,04	0,185
1428	8,30	301	2820	10,62	4,14	0,232	10,40	3,98	0,222
1428	9,06	218	2120	7,72	3,11	0,253	7,40	2,99	0,243

Digitized by Google

II. Versuchsergebnisse für Schrauben mit ebenem, 4,5 cm breitem Profil.

A. Vierflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,54	94	710	8,6	2,59	0,166
816	4,92	− 5	200	0,5	− 0,74	0,230
1020	3,58	215	1510	12,7	3,57	0,134
1020	5,52	50	760	3,0	1,78	0,207
1020	6,04	1	380	0,1	0,89	0,226
1224	3,61	367	2520	14,95	4,11	0,113
1224	5,53	192	1560	7,84	2,55	0,173
1224	7,02	38	710	1,54	1,15	0,219
1428	3,66	561	3780	16,85	4,56	0,098
1428	5,56	365	2770	11,00	3,34	0,149
1428	7,03	200	1870	6,05	2,25	0,188
1428	8,30	36	960	1,09	1,16	0,222

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,56	141	1160	13.0	4,25	0,166
816	5,52	9	250	0.8	0,93	0.258
1020	3,58	299	2270	17,6	5.34	0,134
1020	5,53	137	1280	8,1	3,02	0,207
1020	7,02	1	450	0,1	1,03	0,263
1224	3,63	504	3680	20,60	6,00	0,113
1224	5,56	318	2570	12,95	4,20	0,173
1224	7,03	174	1610	7,12	2,55	0,219
1224	8,30	26	660	1,04	1,07	0.259
1428	3,69	735	5500	22,00	6,63	0,099
1428	5,59	555	4140	16,63	4,96	0,150
1428	7,05	379	3220	11.36	3,88	0,189
1428	8,32	230	2270	6,92	2,72	0,223
1428	9,12	121	1610	3,65	1,94	0,244

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 3^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,56	194	1770	17,80	6,49	0,167
816	4,92	105	1110	9,65	4,06	0,230
816	6,55	− 12	151	− 1,11	0,56	0,306
1020	3,61	377	3230	22,20	7,62	0,135
1020	5,55	229	2170	13,50	5,06	0,208
1020	7,04	101	1210	5,98	2,85	0,264
1020	7,90	17	550	1,03	1,32	0,296
1224	3,58	614	5150	25,00	8,28	0,112
1224	5,57	450	3890	18,40	6,32	0,174
1224	7,04	300	2820	12,20	4,60	0,219
1224	8,32	162	1870	6,62	3,05	0,259
1224	9,12	79	1210	3,25	1,98	0,284
1428	3,72	882	7440	26,50	8,93	0,100
1428	5,62	723	6260	21,75	7,51	0,151
1428	7,07	547	4900	16,40	5,89	0,189
1428	8,34	398	3890	11,95	4,66	0,223
1428	9,14	310	3080	9,32	3,69	0,244

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 5^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,58	236	2270	21,7	8,32	0,168
816	5,52	108	1210	9,9	4,45	0,258
816	7,02	− 4	300	− 0,4	1,11	0,328
1020	3,63	430	3990	25,4	9,39	0,136
1020	5,55	294	2820	17,3	6,66	0,208
1020	7,03	163	1870	9,6	4,41	0,263
1020	8,30	52	810	3,0	1,90	0,311
1224	3,58	703	6420	28,70	10,45	0,112
1224	5,59	544	5100	22,20	8,30	0,174
1224	7,05	405	3880	16,50	6,32	0,220
1224	8,34	272	2830	11,12	4,61	0,260
1224	9,15	184	2170	7,53	3,54	0,285
1428	3,74	976	8900	29,25	10,69	0,100
1428	5,64	843	7740	25,40	9,31	0,151
1428	7,09	678	6460	20,40	7,73	0,189
1428	8,36	535	5250	16,08	6,31	0,224
1428	9,17	446	4540	13,42	5,48	0,245

Digitized by Google

B. Dreiflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,54	57	530	5,3	1,94	0,166
816	4,92	− 23	80	− 2,2	0,28	0,230
1020	3,56	160	1130	9,4	2,67	0,133
1020	5,52	27	430	1,6	1,01	0,207
1224	3,58	283	1890	11,50	3,09	0,112
1224	5,54	135	1130	5,49	1,84	0,172
1224	7,02	4	430	0,15	0,70	0,219
1428	3,62	444	2950	13,30	3,55	0,097
1428	5,55	279	2090	8,37	2,52	0,148
1428	7,03	129	1330	3,87	1,60	0,188
1428	8,30	0	580	0,00	0,70	0,222

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,56	107	880	9,8	3,25	0,166
816	5,51	− 7	150	− 0,6	0,56	0,258
1020	3,58	228	1740	14,4	4,10	0,134
1020	5,51	102	980	6,0	2,31	0,206
1020	7,02	− 9	230	− 0,5	0,54	0,263
1224	3,62	391	2800	15,95	4,57	0,117
1224	5,55	247	1940	10,05	3,16	0,173
1224	7,02	119	1180	4,85	1,93	0,219
1224	8,30	5	430	0,20	0,70	0,259
1428	3,66	571	4320	17,2	5,19	0,098
1428	5,57	423	3300	12,70	3,96	0,149
1428	7,04	282	2400	8,48	2,87	0,188
1428	8,32	154	1640	4,64	1,97	0,223
1428	9,12	77	1130	2,30	1,26	0,244

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 3^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,56	162	1390	14,9	5,08	0,167
816	4,92	87	880	7,9	3,25	0,230
816	6,04	19	350	1,7	1,30	0,282
1020	3,61	312	2600	18,4	6,12	0,135
1020	5,54	190	1690	11,2	3,97	0,207
1020	7,02	77	910	4,5	2,14	0,263
1020	7,89	7	430	0,4	1,01	0,295
1224	3,66	506	4120	20,60	6,71	0,114
1224	5,55	368	3100	15,00	5,06	0,173
1224	7,04	239	2190	9,80	3,56	0,219
1224	8,32	133	1380	5,05	2,26	0,259
1224	9,14	56	880	2,29	1,44	0,285
1428	3,70	721	5940	21,7	7,12	0,099
1428	5,59	573	4820	17,2	5,78	0,150
1428	7,05	436	3860	13,1	4,66	0,189
1428	8,34	317	2950	9,5	3,54	0,223
1428	9,14	234	2400	7,02	2,88	0 244

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 5^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,56	186	1690	17,2	6,27	0,167
816	5,51	79	880	7,4	3,28	0,258
816	7,02	− 12	130	— 1,1	0,47	0,328
1020	3,61	341	3050	20,2	7,28	0,135
1020	5,54	226	2140	13,4	5,07	0,207
1020	7,02	119	1290	7,0	3,06	0,263
1020	8,30	18	530	1,1	1,26	0,311
1224	3,65	542	4820	22,10	7,94	0,114
1224	5,57	416	3760	17,00	6,20	0,174
1224	7,04	297	2750	12,15	4,54	0,219
1224	8,32	186	1940	7,60	3,21	0,259
1224	9,14	113	1380	4,63	2,28	0,285
1428	3,70	785	7000	23,60	8,40	0,100
1428	5,60	655	5820	19,75	7,09	0,150
1428	7,06	521	4820	15,65	5,85	0,189
1428	8,34	395	3760	11,90	4,56	0,223
1428	9,15	318	3200	9,57	3,89	0,245

Digitized by Google

C. Zweiflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,54	46	400	4,2	1,48	0,166
816	4,92	− 14	100	− 1,3	0,37	0,230
1020	3,56	129	910	7,6	2,14	0,133
1020	4,92	59	500	3,5	1,29	0,184
1020	6,04	− 3	200	− 0,2	0,48	0,226
1224	3,58	227	1510	9,25	2,47	0,112
1224	5,51	110	910	4,49	1,48	0,172
1224	7,02	13	350	0,53	0,58	0,219
1428	3,61	353	2370	10,79	2,85	0,097
1428	5,55	225	1670	6,90	2,01	0,148
1428	7,02	113	1110	3,45	1,34	0,188
1428	8,30	17	500	0,51	0,61	0,222

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 746 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,54	80	660	7,3	2.41	0,166
816	5,52	0	150	0,0	0,56	0,258
1020	3,56	180	1360	10,6	3,21	0,133
1020	5,52	84	760	4,9	1,78	0,207
1020	6,55	20	400	1,2	0,95	0,245
1224	3,58	298	2170	12,15	3.55	0,112
1224	5,53	189	1510	7,70	2,47	0,172
1224	7,02	92	910	3,75	1,48	0,219
1224	8,30	6	350	0,26	0,58	0,259
1428	3,61	452	3380	13.60	4,06	0,097
1428	5,55	336	2570	10,15	3,10	0,149
1428	7,02	223	1870	6,70	2,25	0,188
1428	8,32	122	1260	3,66	1,60	0,223
1428	9,14	60	860	1,81	1,01	0,245

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 3^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,52	117	1060	10,8	3,91	0,165
816	5,53	36	450	3,4	1,68	0,258
1020	3,59	232	1970	13,7	4,66	0,135
1020	5,54	136	1260	8,1	3,00	0,207
1020	7,03	55	660	3,2	1,56	0,263
1020	7,90	9	300	0,5	0,72	0,296
1224	5,54	267	2320	10,93	3,80	0,172
1224	7,03	170	1670	6,99	2,58	0,219
1224	8,32	87	1010	3,59	1,56	0,259
1224	9,13	36	610	1,50	0,94	0,284
1428	3,66	531	4390	16,00	5,30	0,098
1428	5,53	425	3580	12,80	4,34	0,148
1428	7,06	322	2830	9,70	3,43	0,189
1428	8,33	232	2220	6,97	2,69	0,222
1428	9,14	175	1770	5,29	2,14	0,244

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 5^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,57	143	1310	13,2	4,85	0,167
816	5,52	63	670	5,8	2,43	0,258
816	6,56	15	300	1,4	1,12	0,307
1020	3,58	263	2370	15,6	5,63	0,134
1020	5,54	178	1670	10,6	3,96	0,207
1020	7,02	97	1060	5,7	2,51	0,263
1020	8,31	27	500	1,6	1,20	0,311
1224	3,64	410	3630	16,80	5,60	0,113
1224	5,56	325	2980	13,25	4,61	0,173
1224	7,05	233	2270	9,56	3,52	0,219
1224	8,32	148	1560	6,07	2,42	0,259
1224	9,13	97	1110	3,95	1,72	0,284
1428	3,66	579	5040	17,40	6,10	0,098
1428	5,58	493	4500	14,83	5,41	0,149
1428	7,06	396	3680	11,93	4,45	0,189
1428	8,35	310	3030	9,38	3,66	0,223
1428	9,14	249	2370	7,50	2,87	0,244

Digitized by Google

III. Versuchsergebnisse für Schrauben mit ebenem, 3 cm breitem Profil.

A. Vierflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 753 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,52	60	530	5,4	1,94	0,165
816	4,90	− 21	80	− 1,9	0,28	0,229
1020	3,54	160	1140	9,3	2,65	0,133
1020	5,49	27	480	1,6	1,12	0,206
1275	3,59	312	2090	11,62	3,14	0,108
1275	5,50	169	1290	6,31	1,92	0,165
1275	6,97	30	580	1,12	0,87	0,209
1275	7,75	− 1	380	− 0,03	0,56	0,232
1428	3,61	433	2900	12,88	3,49	0,097
1428	5,51	268	2050	7,99	2,45	0,147
1428	6,99	124	1390	3,70	1,67	0,187
1428	8,25	2	580	0,06	0,70	0,221

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 753 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,54	107	880	9,7	3,22	0,166
816	5,48	1	230	0,1	0,83	0,256
1020	3,56	233	1740	13,6	4,06	0,133
1020	5,49	100	980	5,9	2,30	0,205
1020	6,98	− 12	230	− 0,7	0,53	0,261
1275	3,61	419	3100	15,64	4,65	0,108
1275	5,51	284	2190	10,59	2,28	0,165
1275	6,99	156	1440	5,78	2,15	0,209
1275	8,25	36	680	1,36	1,02	0,247
1428	3,63	563	4110	16,78	4,90	0,097
1428	5,52	420	3310	12,48	3,93	0,148
1428	7,00	276	2400	8,20	2,85	0,187
1428	8,26	149	1590	4,44	2,89	0,221
1428	9,05	72	1070	2,14	1,27	0,242

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 3^0$;
Barometerstand B = 753 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,54	154	1440	14,0	5,22	0,166
816	5,48	48	510	4,4	1,85	0,256
816	6,00	24	380	2,2	1,38	0,281
1020	3,57	306	2500	17,8	5,87	0,134
1020	5,50	179	1640	10,5	3,92	0,206
1020	6,97	72	930	4,2	2,18	0,261
1020	7,85	− 1	430	− 0,1	1,00	0,294
1275	3,63	517	4360	19,3	6,47	0,109
1275	5,52	410	3520	15,28	5,16	0,165
1275	6,99	281	2500	10,53	3,74	0,209
1275	8,27	165	1690	6,15	2,54	0,248
1275	9,06	92	1140	3,45	1,70	0,272
1428	3,65	674	5570	20.10	6,60	0,098
1428	5,55	558	4710	16,57	5,60	0,148
1428	7,03	434	3860	12,87	4,60	0,188
1428	8,27	312	2950	9,28	3,51	0,221
1428	9,06	229	2400	6,80	2,85	0,242

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 5^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,57	186	1740	17,1	6,45	0,167
816	5,52	85	930	7,8	3,50	0,258
816	7,03	− 7	180	− 0,6	0,65	0,328
1020	3,61	333	3050	19,7	7,27	0,135
1020	5,55	232	2250	13,7	5,30	0,208
1020	7,04	129	1440	7,6	3,41	0,264
1020	8,31	34	650	2,0	1,56	0,311
1275	3,66	553	4920	20,9	7,45	0,110
1275	5,58	473	4260	17,88	6,49	0,167
1275	7,06	360	3400	13,60	5,18	0,211
1275	8,33	259	2600	9,78	3,95	0,249
1275	9,13	176	1990	6,67	3,03	0,273
1428	3,68	705	6590	21,25	7,97	0,098
1428	5,61	620	5770	18,68	6,98	0,150
1428	7,09	528	4920	15,87	5,95	0,190
1428	8,35	411	4060	12,40	4,92	0,223
1428	9,14	334	3360	10,05	4,06	0,244

Digitized by Google

B. Dreiflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 760 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,50	46	380	4,1	1,36	0,164
816	4,86	− 22	76	− 2,1	0,27	0,227
1020	3,52	124	930	7,2	2,16	0,132
1020	5,45	8	330	0,4	0,76	0,204
1224	3,56	219	1490	8,74	2,38	0,115
1224	5,45	97	930	3,89	1,50	0,169
1224	6,93	− 10	380	− 0,42	0,60	0,216
1428	3,75	342	2300	10,05	2,70	0,100
1428	5,48	207	1540	6,09	1,81	0,147
1428	6,93	87	930	2,55	1,05	0,185
1428	8,20	− 15	430	− 0,43	0,50	0,219

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 760 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,64	83	630	7,5	2,26	0,170
816	5,45	− 8	130	− 0,7	0,45	0,254
1020	3,52	179	1390	10,3	3,22	0,132
1020	5,45	65	730	3,8	1,69	0,204
1020	6,95	− 21	180	− 1,2	0,41	0,260
1224	3,52	197	2250	11,7	3,60	0,110
1224	5,46	191	1540	7,62	2,46	0,170
1224	6,95	73	890	2,39	1,43	0,217
1224	8,21	− 15	380	− 5,82	0,60	0,256
1428	3,60	434	3310	12,58	3,90	0,096
1428	5,50	328	2500	9,66	2,94	0,147
1428	6,95	215	1850	6,32	2,17	0,186
1428	8,22	103	1190	3,05	1,40	0,220
1428	9,05	47	780	1,38	0,92	0,242

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 3^0$;
Barometerstand B = 760 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,52	125	980	11,1	3,54	0,164
816	4,95	62	580	5,6	2,08	0,231
816	5,95	8	250	0,7	0,91	0,278
1020	3,55	229	1840	13,2	4,26	0,133
1020	5,46	138	1240	8,0	2,86	0,205
1020	6,96	52	580	3,0	1,34	0,261
1020	7,79	− 5	180	− 0,3	0,41	0,292
1224	3,75	355	3050	14,2	4,89	0,117
1224	5,47	265	2350	10,6	3,76	0,170
1224	6,94	178	1690	7,13	2,71	0,216
1224	8,21	93	1090	3,72	1,74	0,256
1224	9,02	31	680	1,24	1,09	0,281
1428	3,62	518	4320	15,2	5,08	0,097
1428	5,50	423	3660	12,45	4,30	0,147
1428	6,96	335	2950	9,90	3,48	0,186
1428	8,22	234	2200	6,90	2,56	0,220
1428	9,03	169	1690	4,98	1,99	0,242

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 5^0$;
Barometerstand B = 753 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,54	130	1130	11,8	4,16	0,166
816	5,50	60	630	5,5	2,32	0,257
816	6,53	7	280	0,7	1,02	0,305
1020	3,55	250	2250	14,7	5,27	0,133
1020	5,57	170	1590	10,0	3,74	0,208
1020	7,00	79	880	4,6	2,07	0,262
1020	8,26	9	380	0,5	0,89	0,309
1224	3,60	381	3410	15,44	5,54	0,114
1224	5,53	312	2850	12,65	4,65	0,174
1224	6,99	225	2190	9,17	3,56	0,218
1224	8,27	129	1540	5,27	2,51	0,258
1224	9,10	84	1130	3,39	1,85	0,284
1428	3,65	539	4290	16,09	5,91	0,098
1428	5,56	475	4370	14,2	5,24	0,148
1428	7,04	398	3710	11,90	4,46	0,188
1428	8,30	308	3000	9,23	3,61	0,222
1428	9,11	230	2500	6,90	3,00	0,243

Digitized by Google

C. Zweiflügelige Schrauben.

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 753 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,53	37	330	3,4	1,21	0,165
816	4,91	− 9	50	− 0,8	0,18	0,229
1020	3,53	95	660	5,6	1,54	0,134
1020	5,51	15	330	0,9	0,78	0,206
1275	3,55	190	1220	7,13	1,84	0,106
1275	5,50	93	760	3,52	1,14	0,165
1275	6,99	18	350	0,67	0,53	0,209
1428	3,53	257	1720	7,69	2,06	0,094
1428	5,50	162	1210	4,28	1,45	0,147
1428	7,00	75	760	2,26	0,91	0,187
1428	8,28	− 5	330	− 0,15	0,40	0,222

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 753 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
816	3,53	64	500	5,8	1,84	0,165
816	5,50	− 6	100	− 0,5	0,37	0,257
1020	3,54	132	1060	7,7	2,49	0,133
1020	5,51	57	550	3,3	1,30	0,206
1020	7,00	− 7	150	− 0,4	0,36	0,262
1275	3,55	237	1770	8,89	2,66	0,106
1275	5,52	167	1260	6,29	1,90	0,165
1275	7,00	88	760	3,31	1,14	0,210
1275	8,30	16	350	0,61	0,53	0,249
1428	3,56	321	2420	9,60	2,91	0,095
1428	5,53	246	1870	7,37	2,24	0,148
1428	7,00	159	1360	4,75	1,64	0,187
1428	8,30	90	910	2,68	1,05	0,222
1428	9,08	33	660	1,00	0,79	0,243

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 3^0$;
Barometerstand B = 753 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,52	90	760	8,2	2,76	0,165
816	4,90	48	500	4,4	1,84	0,229
816	5,99	10	250	1,0	0,92	0,280
1020	3,54	163	1410	9,5	3,30	0,133
1020	6,00	91	910	5,3	2,12	0,225
1020	6,98	44	610	2,6	1,42	0,261
1020	7,85	8	300	0,5	0,71	0,294
1275	3,57	279	2370	10,42	3,55	0,107
1275	5,50	230	1920	8,59	2,87	0,165
1275	6,99	156	1360	5,84	2,04	0,209
1275	8,25	90	910	3,33	1,36	0,247
1275	9,05	44	610	1,63	0,91	0,271
1428	3,59	368	3030	10,95	3,60	0,096
1428	5,51	309	2620	9,20	3,12	0,147
1428	7,00	248	2170	7,39	2,58	0,187
1428	8,26	168	1560	5,04	1,86	0,221
1428	9,06	117	1160	3,49	1,38	0,242

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 5^0$;
Barometerstand B = 753 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
816	3,54	103	910	9,4	3,30	0,166
816	5,49	46	500	4,2	1,84	0,257
816	6,97	− 8	50	− 0,7	0,18	0,326
1020	3,54	184	1670	10,8	3,90	0,133
1020	5,50	135	1260	7,9	2,95	0,206
1020	6,97	70	760	4,1	1,76	0,261
1020	8,25	16	350	0,9	0,83	0,309
1275	3,57	299	2730	11,18	4,09	0,107
1275	5,51	256	2320	9,58	3,47	0,165
1275	6,99	201	1870	7,50	2,80	0,209
1275	8,26	132	1360	4,91	2,04	0,248
1275	9,05	96	1060	3,60	1,59	0,271
1428	3,59	389	3530	11,58	4,20	0,096
1428	5,52	350	3280	10,43	3,90	0,148
1428	7,00	301	2820	8,95	3,35	0,187
1428	8,30	231	2280	6,89	2,71	0,222
1428	9,06	180	1870	5,35	2,22	0,242

Digitized by Google

IV. Versuchsergebnisse für Schrauben mit gewölbtem, 6 cm breiten Profil.

A. Vierflügelige Schrauben.

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 4 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = -3^0$; Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 20^0.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
800	3,57	178	1270	18,7	5,40	0.174	18.3	5,29	0,169
800	5,53	14	590	1,5	2,49	0,270	1,4	2,44	0,265
1000	3,62	362	2350	24,2	6,40	0,141	23,7	6,26	0,136
1000	5,54	190	1640	13,7	4,49	0,216	13,5	4,40	0,211
1000	7,02	16	880	1,1	2,40	0,274	1,1	2,35	0,269
1200	3,66	593	3520	27,60	6,62	0.119	27.05	6.49	0,114
1200	5,59	405	2790	18,10	5,24	0,182	17,75	5,13	0,176
1200	7,05	226	2050	10,52	3,86	0,229	10,30	3,78	0,224
1200	8,32	47	1270	2,17	2,40	0,270	2,13	2,35	0,265
1400	3,73	871	5250	29,80	7,24	0,104	29,20	7,09	0,099
1400	5,61	660	4410	22,55	6,10	0,156	22,14	5,97	0,151
1400	7,06	468	3570	16,00	4,94	0,197	15,69	4,84	0,192
1400	8,34	299	2940	10,20	4,05	0,232	10,00	3,97	0,227
1400	9,15	184	2160	6,32	2,99	0,254	6,20	2,93	0,249

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 4 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 0^0$; Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 20^0.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
800	3,59	241	1710	25,1	7,29	0,175	24,6	7,14	1,170
800	5,52	93	1030	9,7	4,36	0,269	9,5	4,26	0,264
800	6,55	− 7	490	− 0,7	2,09	0,320	— 0,7	2,04	0,314
1000	3,64	446	3030	30,0	8,29	0,144	29,4	8,11	0,139
1000	5,55	292	2300	19,6	6,28	0,217	19,2	6,15	0,212
1000	7,04	137	1620	9,2	4,40	0,275	9,0	4,31	0,270
1000	8,31	− 16	730	− 1,1	2,00	0,325	− 1,1	1,96	0,320
1200	3,71	725	4750	33,60	8,98	0,120	32,85	8,79	0,115
1200	5,60	555	4020	25,80	7,59	0,182	25,25	7,44	0,177
1200	7,06	384	3180	17,80	6,00	0,229	17,44	5,88	0,224
1200	8,34	230	1910	11,00	3,60	0,271	10,77	3,52	0,265
1200	9,15	119	1810	5,52	3,41	0,297	5,40	3,34	0,292
1400	3,77	1044	2010	35,60	9,58	0,105	34,85	9,38	0,100
1400	5,56	845	5970	28,95	8,31	0,156	28,35	8,15	0,150
1400	7,09	689	5290	23,50	7,30	0,198	23,00	7,15	0,193
1400	8,35	508	4260	17,35	5,93	0,233	16,99	5,81	0,228
1400	8,35	515	4310	17,60	6,05	0,233	17,22	5,93	0,227
1400	9,18	405	3720	13,32	5,19	0,256	13,54	5,09	0,250

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 4 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 3^0$; Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
800	3,60	299	2250	31,4	9,62	0,176	30,8	9,43	0,171
800	5,55	161	1520	16,9	6,49	0,271	16,6	6,36	0,266
800	7,05	27	730	2,8	3,14	0,344	2,8	3,08	0,339
1000	3,67	535	3970	36,0	10,85	0,143	34,4	10,63	0,138
1000	5,58	387	3230	26,2	8,84	0,218	25,7	8,66	0,213
1000	7,06	258	2450	17,4	6,70	0,276	17,1	6,57	0,271
1000	8,35	131	1710	8,8	4,68	0,326	8,6	4,59	0,321
1000	9,16	22	1080	1,5	2,95	0,358	1,4	3,01	0,353
1200	3,74	831	5980	38,75	11,30	0,121	37,89	11,08	0,116
1200	5,63	687	5340	32,00	10,08	0,183	31,35	9,82	0,178
1200	7,10	523	4450	24,40	8,43	0,221	23,90	8,25	0,215
1200	8,36	387	3620	18,05	6,85	0,272	17,70	6,71	0,266
1200	9,17	284	2990	13,20	5,63	0,298	12,94	5,52	0,293
1400	3,58	1215	8710	41,50	12,18	0,100	40,70	11,92	0,095
1400	5,68	1016	7650	34,65	10,65	0,158	34,90	10,44	0,153
1400	7,05	852	6800	29,10	9,50	0,196	28,50	9,30	0,191
1400	8,40	719	6070	24,50	8,44	0,234	24,00	8,26	0,229
1400	9,22	600	5410	20,45	7,54	0,257	20,00	7,39	0,252

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 4 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 5^0$; Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
800	3,62	357	2810	37,6	12,00	0,177	36,8	11,75	0,172
800	5,55	224	2080	23,5	8,90	0,272	23,1	8,71	0,267
800	7,04	98	1300	10,3	5,53	0,343	10,1	5,42	0,333
800	8,35	− 32	370	− 3,4	1,57	0,407	− 3,3	1,53	0,402
1000	3,68	601	4720	40,6	12,90	0,144	39,8	12,64	0,139
1000	5,60	468	3940	31,6	10,75	0,219	31,0	10,54	0,214
1000	7,09	327	3160	22,2	8,65	0,277	21,8	8,58	0,272
1000	8,36	212	2370	14,3	6,50	0,326	14,1	6,37	0,321
1000	9,17	121	1790	8,2	4,90	0,358	8,0	4,80	0,353
1200	3,75	929	7330	43,10	13,85	0,122	42,20	13,59	0,117
1200	5,63	780	6390	36,40	12,08	0,183	35,65	11,84	0,178
1200	7,11	642	5660	29,90	10,72	0,231	29,30	10,50	0,226
1200	8,37	493	4770	22,80	9,03	0,272	22,35	8,85	0,267
1200	9,20	409	4090	19,01	772	0,298	18,65	7,57	0,294
1350	3,77	1191	9480	44,10	14,20	0,109	43,20	13,92	0,104
1350	5,68	1027	8350	38,00	12,53	0,164	37,25	12,29	0,159
1350	7,14	877	7520	32,50	11,32	0,206	31,85	11,10	0,201
1350	8,40	735	6590	27,25	9,89	0,242	26,70	9,69	0,237
1350	9,24	667	6310	24,50	9,48	0,267	24,00	9,28	0,262

Digitized by Google

B. Dreiflügelige Schrauben.

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 3 Flügel (Radius R = 24,5 m); Verstellungswinkel $\beta = -3^0$; Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19 °.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
800	3,56	144	1080	15,0	4,56	0,174	14,7	4,46	0,169
800	5,51	6	460	6,3	1,97	0,269	6,2	1,93	0,264
1050	3 61	338	2250	20,4	5,57	0 134	20,0	5,46	0,129
1050	5,52	192	1660	11,6	4,10	0,205	11,3	4,02	0,200
1050	7,03	45	980	2,8	2,41	0,268	2,7	2,36	0,263
1050	7,50	− 1	780	−0,5	1,93	0,279	− 0,5	1,89	0,274
1200	3,63	485	3040	22,40	5,70	0,118	21,95	5,59	0,113
1200	5,55	326	2450	15,00	4,60	0,180	14,70	4,52	0,175
1200	7,02	182	1830	8,41	3,45	0,228	8,25	3,38	0,223
1200	8,30	33	1130	1,55	2,12	0,269	1,52	2,08	0,264
1200	8,72	− 21	880	—1,96	1,66	0,283	− 1,92	1,63	0,278
1350	3,68	653	4060	23,90	6,07	0,106	23,45	5,95	0,101
1350	5,56	489	3480	17,80	5,20	0,161	17,44	5,10	0,156
1350	7,05	334	2740	11,19	4,09	0,204	10,98	4,01	0,198
1350	8,30	186	2100	6,79	3,15	0,240	6,65	3,09	0,235
1350	9,12	77	1570	2,80	2,34	0,263	2,75	2,29	0,258

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 3 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 0^0$; Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
800	3,56	197	1470	20,4	6,24	0,174	20,0	6,12	0,169
800	5,50	74	880	7,7	3,75	0,268	7,5	3,68	0,263
800	6,55	−10	440	—1,3	1,88	0,319	—1,2	1,84	0,314
1050	3,63	427	2980	25,8	7,35	0,135	25,3	7,20	0,130
1050	5,53	289	1670	17,4	5,79	0,206	17,1	5,68	0,200
1050	7,02	156	980	9,4	4,10	0,261	9,2	4,02	0,256
1050	8,30	23	230	1,4	2,41	0,309	1,3	2,36	0,304
1200	3,65	595	4010	27,50	7,55	0,119	26,95	7,40	0,113
1200	5,56	442	3380	20,40	6,37	0,181	20,00	6,25	0,176
1200	7,04	313	2690	14,42	5,08	0,228	14,14	4,98	0,223
1200	8,31	183	2060	8,44	3,86	0,270	8,26	3,78	0,265
1200	9,12	93	1570	4,27	2,95	0,296	4,19	2,90	0,291
1350	3,70	789	5390	28,75	8,02	0,107	28,20	7,87	0,102
1350	5,60	626	4650	22,45	6,92	0,162	22,00	6,77	0,157
1350	7,05	492	4010	17,95	6,00	0,204	17,60	5,88	0,199
1350	8,34	301	3280	11,00	4,90	0,241	10,78	4,80	0,236
1350	9,15	266	2790	9,70	4,15	0,265	9,50	4,07	0,259

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 3 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 3^0$; Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 μ'	1000 μ'	λ'
800	3,64	241	1960	25,4	8,39	0,178	24,9	8,22	0,173
800	5,60	129	1320	14,5	5,66	0,273	14,2	5,55	0,268
800	7,10	22	640	2,3	2,73	0,346	2,3	2,67	0,341
1050	3,68	498	3720	30,3	9,21	0,137	29,7	9,04	0,132
1050	5,64	371	3080	22,5	7,67	0,210	22,1	7,52	0,205
1050	7,14	253	2450	15,4	6,08	0,265	15,0	5,96	0,260
1050	8,44	141	1740	8,6	4,31	0,314	8,4	4,23	0,309
1050	9,25	61	1270	3,7	3,15	0,344	3,6	3,09	0,339
1200	3,72	690	5050	32,15	9,59	0,121	31,53	9,40	0,116
1200	5,66	560	4350	26,00	8,28	0,184	25,48	8,12	0,179
1200	7,15	437	3720	20,30	7,05	0,232	19,90	6,91	0,227
1200	8,45	314	2980	14,60	5,68	0,274	14,30	5,57	0,269
1200	9,27	237	2450	11,00	4,65	0,301	10,78	4,56	0,296
1350	3,78	899	6660	33,10	9,90	0,109	32,40	9,70	0,104
1350	5,69	759	5830	27,90	8,78	0,165	27,30	8,60	0,160
1350	7,17	631	5190	23,20	7,80	0,207	22,70	7,65	0,202
1350	8,47	514	4410	18,90	6,63	0,245	18,50	6,50	0,240
1350	9,28	328	3970	15,20	5,97	0,268	14,90	5,85	0,263

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 3 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 5^0$; Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
800	3,64	275	2250	29,4	9,81	0,178	28,8	9,62	0,173
800	5,60	166	1620	17,8	7,03	0,273	17,5	6,90	0,268
800	7,11	61	980	6,6	4,26	0,347	6,4	4,18	0,342
800	8,00	— 9	540	— 0,9	2,35	0,390	— 0,9	2,30	0,385
1000	3,68	488	3970	33,5	11,13	0,144	32,8	10,92	0,138
1000	5,64	371	3330	25,4	9,30	0,221	24,9	9,13	0,215
1000	7,13	258	2640	17,7	7,40	0,279	17,4	7,25	0,273
1000	8,44	157	1960	10,7	5,20	0,330	10,5	5,10	0,324
1000	9,25	79	1470	5,4	4,11	0,362	5,3	4,03	0,356
1200	3,74	749	5880	35,50	12,15	0,115	34,70	11,13	0,116
1200	5,68	632	5190	29,50	10,05	0,184	28,95	9,85	0,179
1200	7,16	510	4550	24,15	8,82	0,233	23,70	8,65	0,228
1200	8,45	398	3820	18,85	7,39	0,275	18,50	7,25	0,269
1200	9,29	320	3330	15,15	6,42	0,302	14,85	6,29	0,296
1350	3,80	971	7790	36,50	11,92	0,110	35,80	11,70	0,105
1350	5,70	828	6810	31,00	10,45	0,165	30,40	10,25	0,160
1350	7,17	688	5980	25,77	9,18	0,207	25,80	9,00	0,202
1350	8,48	603	5490	22,60	8,40	0,245	22,17	8,24	0,240
1350	9,30	531	5000	20,00	7,66	0,269	19,60	7,51	6,264

Digitized by Google

C. Zweiflügelige Schrauben.

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 2 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = -3^0$; Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
800	3,57	115	760	11,7	3,23	0,174	11,4	3,17	0,169
800	5,52	14	320	1,4	1,35	0,269	1,4	1,32	0,264
1000	3,59	236	1400	15,8	3,80	0,140	15,5	3,72	0,135
1000	5,54	124	980	8,3	2,66	0,216	8,1	2,61	0,211
1000	7,02	19	510	1,3	1,40	0,274	1,3	1,37	0,269
1200	3,62	373	2130	17,30	4,01	0,118	16,95	3,93	0,112
1200	5,55	260	1690	12,10	3,18	0,180	11,86	3,12	0,175
1200	7,03	148	1270	6,89	2,39	0,228	6,75	2,34	0,223
1200	8,32	41	810	1,92	1,52	0,270	1,88	1,49	0,265
1400	3,66	540	3210	18,53	4,45	0,102	18,18	4,36	0,097
1400	5,58	434	2770	14,80	3,82	0,156	14,50	3,75	0,150
1400	5,58	431	2770	14,77	3,82	0,156	14,48	3,75	0,150
1400	7,06	318	2280	10,85	3,16	0,197	10,63	3,10	0,191
1400	8,33	196	1790	6,73	2,48	0,232	6,60	2,43	0,227
1400	9,15	124	1440	4,25	2,00	0,255	4,17	1,96	0,250

Gewölbtes Profil; Breite B = 6 cm; 2 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 0^0$; Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ	1000 φ'	1000 μ'	λ'
800	3,57	147	1000	15,4	4,25	0,174	15,1	4,17	0,169
800	5,58	53	560	5,5	2,39	0,272	5,4	2,34	0,267
800	6,55	− 5	270	− 0,5	1,14	0,320	− 0,5	1,12	0,325
1000	3,59	286	1840	19,2	4,98	0,140	18,8	4,88	0,135
1000	5,54	179	1350	12,0	3,67	0,217	11,8	3,59	0,212
1000	7,04	108	910	7,2	2,47	0,275	7,1	2,42	0,270
1000	8,32	− 6	420	− 0,4	1,14	0,325	− 0,4	1,11	0,320
1250	3,64	496	3140	21,22	5,45	0,110	20,80	5,34	0,105
1250	5,58	389	2570	16,60	4,54	0,174	16,20	4,36	0,169
1250	7,05	287	2180	12,22	3,76	0,220	11,98	3,68	0,214
1250	8,35	186	1640	7,91	2,85	0,260	7,75	2,79	0,255
1250	9,15	119	1300	5,08	2,25	0,285	4,98	2,20	0,280
1400	3,68	659	4140	22,50	5,71	0,103	22,07	5,60	0,098
1400	5,59	531	3550	18,20	4,91	0,156	17,83	4,81	0,151
1400	7,07	423	3110	14,44	4,30	0,197	14,16	4,22	0,192
1400	8,35	338	2670	11,58	3,70	0,232	11,34	3,63	0,227
1400	9,16	260	2330	8,90	3,21	0,255	8,73	3,15	0,250

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 2 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 3^0$; Barometerstand B = 754 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
750	3,57	160	1220	19,1	5,93	0,186	18,7	5,81	0,181
750	5,61	74	760	8,6	3,69	0,292	8,4	3,62	0,287
750	7,02	− 2	220	− 0,2	1,07	0,366	− 0,2	1,05	0,361
950	3,59	296	2080	21,9	6,27	0,147	21,5	6,15	0,142
950	5,55	211	1640	15,6	4,91	0,228	15,3	4,81	0,222
950	7,04	124	1250	9,2	3,75	0,288	9,0	3,68	0,283
950	8,32	55	710	4,0	2,14	0,341	4,0	2,10	0,336
950	9,15	− 18	370	− 1,3	1,11	0,375	− 1,3	1,08	0,370
1200	3,66	527	3650	24,50	6,90	0,119	24,00	6,78	0,114
1200	5,58	420	3060	19,60	5,79	0,181	19,20	5,67	0,176
1200	7,06	339	2620	15,80	4,95	0,229	15,49	4,85	0,224
1200	8,35	243	2130	11,14	4,02	0,271	10,93	3,94	0,266
1200	9,15	182	1740	8,44	3,28	0,297	8,27	3,22	0,292
1400	3,71	752	5170	25,75	7,19	0,103	25,25	7,05	0,098
1400	5,61	646	4580	22,10	6,35	0,156	21,67	6,23	0,151
1400	7,09	538	3940	18,40	5,47	0,198	18,04	5,36	0,192
1400	8,37	464	3650	15,83	5,07	0,233	15,52	4,97	0,228
1400	9,17	386	3300	13,22	4,60	0,256	12,96	4,51	0,251

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm; 2 Flügel (Radius R = 24,5 cm); Verstellungswinkel $\beta = 5^0$; Barometerstand B = 754 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ	1000 ψ'	1000 μ'	λ'
800	3,59	218	1640	22,8	6,98	0,175	22,3	6,85	0,170
800	5,54	137	1200	14,4	5,10	0,270	14,1	5,00	0,265
800	7,02	59	730	6,1	3,13	0,342	6,0	3,07	0,337
800	7,90	15	370	1,5	1,57	0,386	1,5	1,53	0,381
950	3,62	336	2520	24,6	7,56	0,148	24,1	7,41	0,143
950	5,55	252	2030	18,6	6,11	0,227	18,2	5,99	0,217
950	7,04	166	1490	12,2	4,49	0,288	11,9	4,40	0,283
950	8,33	91	1050	6,7	3,15	0,341	6,6	3,09	0,336
950	9,15	45	710	3,3	2,13	0,375	3,3	2,09	0,370
1200	3,66	580	4250	27,10	8,03	0,119	26,58	7,87	0,114
1200	5,59	473	3600	22,00	6,79	0,182	21,57	6,65	0,177
1200	7,06	397	3160	18,45	5,98	0,229	18,09	5,86	0,224
1200	8,36	317	2720	14,75	5,13	0,272	14,46	5,03	0,266
1200	9,16	260	2370	12,15	4,48	0,297	11,90	4,39	0,292
1400	3,74	810	6200	27,60	8,60	0,104	27,00	8,44	0,099
1400	5,61	689	5420	23,40	7,53	0,156	22,90	7,38	0,151
1400	7,10	607	4870	20,60	6,78	0,198	20,20	6,62	0,193
1400	8,37	542	4530	18,40	6,30	0,233	18,00	6,16	0,228
1400	9,17	486	4190	16,67	5,80	0,255	16,33	5,68	0,250

Digitized by Google

V. Versuchsergebnisse für Schrauben mit gewölbtem, 4,5 cm breitem Profil.

A. Vierflügelige Schrauben.

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 18°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec.	P g	M cm g	1000 ζ'	1000 μ	λ
800	3,56	173	1220	16,5	4,70	0,171
800	5,50	19	540	1,9	2,60	0,263
1000	3,60	346	2300	21,0	5,61	0,137
1000	5,51	166	1660	10,1	4,00	0,218
1000	7,00	6	830	0,4	2,03	0,267
1200	3,65	562	3480	23,80	5,90	0,116
1200	5,55	381	2840	16,15	4,81	0,177
1200	7,02	216	2250	9,16	3,81	0,224
1200	8,29	62	1420	2,65	2,41	0,264
1200	8,69	3	1170	0,12	2,00	0,275
1400	3,72	804	5000	25,05	6,23	0,102
1400	5,59	649	4360	20,25	5,44	0,153
1400	7,05	473	3700	14,75	4,62	0,192
1400	8,31	303	2980	9,45	3,72	0,227
1400	9,11	195	2400	6,09	3,00	0,249

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 18°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ζ'	1000 μ	λ
800	3,58	236	1660	22,5	6,39	0,171
800	5,50	98	1030	9,4	4,05	0,263
800	6,54	− 2	490	− 0,2	1,88	0,313
1000	3,63	430	2980	26,1	7,29	0,138
1000	5,53	281	2350	17,1	5,74	0,211
1000	7,00	148	1660	9,0	4,06	0,267
1000	8,29	0	810	0,0	1,97	0,316
1200	3,67	682	4600	28,95	7,65	0,117
1200	5,57	528	3970	22,40	6,72	0,178
1200	7,02	376	3280	15,95	5,57	0,224
1200	8,31	231	2540	9,79	4,30	0,265
1200	9,11	132	1960	5,61	3,32	0,290
1400	3,74	977	6370	30,45	7,95	0,102
1400	5,61	818	5780	25,50	7,20	0,153
1400	7,06	662	5090	20,70	6,34	0,193
1400	8,34	503	4310	15,75	5,39	0,228
1400	9,15	410	3870	12,80	4,82	0,250

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel β = 3°; Barometerstand B = 747 mm; Temperatur T = 17°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec.	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
800	3,56	283	2200	26,9	8,65	0,170
800	5,49	161	1520	15,3	5,94	0,263
800	7,05	35	780	3,3	3,00	0,338
800	7,45	− 3	490	− 0,3	1,87	0,355
950	3,61	440	3370	29,6	9,10	0,145
950	5,52	313	2740	21,1	7,38	0,222
950	6,97	185	2010	12,4	5,42	0,281
950	8,25	41	1130	2,8	3,05	0,332
950	8,66	13	910	0,9	2,45	0,348
1200	3,68	784	5680	33,20	9,60	0,117
1200	5,57	646	5000	27,30	8,47	0,177
1200	7,03	510	4480	21,55	7,58	0,224
1200	8,29	375	3720	15,85	6,30	0,264
1200	9,09	289	3170	12,24	5,38	0,289
1400	3,75	1101	7890	34,25	9,80	0,102
1400	5,60	964	7150	29,90	8,90	0,153
1400	7,06	820	6510	24,80	8,12	0,193
1400	8,31	683	5730	21,20	7,14	0,227
1400	9,11	594	5290	18.40	6,58	0,249

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel β = 5°; Barometerstand B = 747 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
800	3,60	323	2550	31,2	9,82	0,172
800	5,56	205	1910	19,9	7,40	0,266
800	7,00	93	1220	9,0	4,75	0,335
800	8,34	− 27	340	− 2,6	1,33	0,399
950	3,64	485	3970	33,2	10,92	0,147
950	5,57	373	3300	25,6	9,10	0,224
950	7,06	253	2590	17,3	7,10	0,284
950	8,35	144	1860	9,8	5,10	0,336
950	9,16	61	1320	4,2	3,64	0,369
1200	3,74	848	6660	36,50	11,42	0,119
1200	5,64	724	5880	31,00	10,40	0,180
1200	7,10	607	5240	25,90	9,00	0,226
1200	8,38	490	4550	21,00	7,84	0,267
1200	9,19	397	4020	17,00	6,90	0,292
1400	3,82	1195	9650	37,80	12,05	0,104
1400	5,67	1064	8620	34,50	10,88	0,155
1400	7,14	941	7890	29,70	9,94	0,195
1400	8,42	828	7300	26,10	9,21	0,230
1400	9,22	740	6750	23,30	8,55	0,254

Digitized by Google

B. Dreiflügelige Schrauben.

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
800	3,56	134	980	12,9	3,80	0,171
800	5,51	9	490	0,8	1,90	0,264
1000	3,58	272	1810	16,7	4,45	0,137
1000	5,52	140	1270	8,6	3,15	0,211
1000	7,01	9	690	0,5	1,68	0,268
1200	3,53	454	2790	19,40	4,76	0,113
1200	5,55	302	2200	12,88	3,77	0,177
1200	7,02	174	1660	7,48	2,85	0,224
1200	8,30	36	1080	1,55	1,84	0,264
1200	8,72	− 18	780	− 0,77	1,34	0,278
1350	3,68	606	3580	20,40	4,83	0,104
1350	5,57	455	3030	15,30	4,09	0,157
1350	7,05	310	2500	10,45	3,36	0,199
1350	8,31	178	1910	5,99	2,57	0,234
1350	9,17	95	1470	3,16	1,98	0,259

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
800	3,56	189	1320	18,2	5,10	0,170
800	5,51	74	830	7,2	3,21	0,264
800	6,55	− 5	440	− 0,4	1,71	0,314
1000	3,61	346	2400	21,2	5,90	0,138
1000	5,54	224	1860	13,7	4,56	0,212
1000	7,02	111	1320	6,8	3,25	0,268
1000	8,30	− 11	640	− 0,7	1,56	0,317
1200	3,66	547	3570	23,40	6,15	0,117
1200	5,57	423	3080	18,05	5,29	0,177
1200	7,04	295	2590	12,60	4,45	0,224
1200	8,31	178	1960	7,60	3,35	0,265
1200	9,12	95	1520	4,07	2,60	0,291
1350	3,70	719	4650	24,20	6,27	0,104
1350	5,58	581	4110	19,55	5,52	0,157
1350	7,05	457	3620	15,40	4,89	0,199
1350	8,34	330	2940	11,13	3,95	0,235
1350	9,15	253	2590	8,51	3,50	0,258

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel β = 3°; Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec.	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
800	3,58	236	1810	22,8	7,00	0,171
800	5,52	129	1270	12,5	4,91	0,264
800	7,00	32	680	3,1	2,65	0,335
1000	3,63	409	3030	25,1	7,44	0,139
1000	5,55	308	2540	18,8	6,22	0,212
1000	7,05	201	2010	12,3	4,95	0,269
1000	8,30	96	1370	5,9	3,35	0,317
1000	9,14	30	930	1,9	2,30	0,349
1200	3,68	635	4700	27,20	8,05	0,117
1200	5,59	526	4120	22,50	7,04	0,178
1200	7,06	415	3620	17,80	6,20	0,225
1200	8,35	304	2940	13,00	5,02	0,266
1200	9,15	232	2300	9,90	4,26	0,292
1350	3,72	825	6070	27,60	8,17	0,102
1350	5,61	708	5440	23,75	7,32	0,153
1350	7,06	590	4850	19,80	6,52	0,193
1350	8,35	493	4310	16,58	5,81	0,228
1350	9,16	418	3970	14,05	5,34	0,250

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel β = 5°; Barometerstand B = 751 mm; Temperatur T = 18°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
800	3,58	257	2060	24,7	8,30	0,172
800	5,51	177	1520	16,9	5,81	0,264
800	7,00	74	1040	7,1	3,96	0,336
800	8,29	− 27	240	− 2,5	0,94	0,397
1000	3,63	446	3580	27,2	8,73	0,138
1000	5,55	350	3040	21,3	7,40	0,212
1000	7,02	253	2500	15,4	6,19	0,268
1000	8,30	157	1910	9,5	4,65	0,317
1000	9,11	90	1420	5,5	3,46	0,348
1200	3,65	688	5440	29,20	9,20	0,116
1200	5,57	587	4750	24,90	8,05	0,178
1200	7,05	489	4210	20,70	7,14	0,224
1200	8,33	388	3670	16,40	6,22	0,265
1200	9,13	315	3230	13,40	5,48	0,291
1350	3,69	881	7170	29,50	9,62	0,104
1350	5,60	776	6410	25,90	8,60	0,158
1350	7,06	678	5780	22,55	7,75	0,199
1350	8,34	577	5240	19,25	7,03	0,235
1350	9,15	509	4900	16,95	6,58	0,258

Digitized by Google

C. Zweiflügelige Schrauben.

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ'	1000 μ	λ
800	3,56	97	6120	9,4	2,39	0,171
800	5,54	6	2200	0,6	0,86	0,265
950	3,58	173	1100	11,9	3,04	0,144
950	5,54	80	730	5,5	2,03	0,223
950	7,05	− 20	270	− 1,4	0,74	0,284
1200	3,63	330	1790	14,30	3,10	0,116
1200	5,57	229	1440	9,90	2,50	0,178
1200	7,06	132	1080	5,72	1,86	0,225
1200	8,35	36	640	1,56	1,10	0,266
1200	8,78	0	460	0,08	0,80	0,280
1400	3,65	496	2470	15,85	3,14	0,100
1400	5,58	381	2080	12,20	2,65	0,153
1400	7,07	276	1690	8,82	2,15	0,193
1400	8,36	178	1250	5,68	1,59	0,229
1400	9,19	114	1000	3,62	1,28	0,251

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ'	1000 μ	λ
800	3,58	131	860	12,8	3,35	0,172
800	5,54	45	470	4,4	1,81	0,265
800	6,59	− 7	170	− 0,7	0,67	0,315
950	3,58	220	1390	15,1	3,58	0,144
950	5,55	127	1050	8,9	2,90	0,223
950	7,05	48	710	3,3	1,96	0,284
950	7,93	− 19	340	− 1,3	0,95	0,319
1200	3,63	388	2320	16,80	4,01	0,116
1200	5,57	295	1930	12,75	3,35	0,178
1200	7,07	211	1540	9,12	2,67	0,225
1200	8,35	120	1100	5,22	1,90	0,266
1200	9,19	64	810	2,75	1,40	0,293
1400	3,67	562	3110	17,95	3,95	0,100
1400	5,60	466	2720	14,85	3,45	0,153
1400	7,09	374	2320	11,92	2,95	0,194
1400	8,37	283	1930	9,00	2,45	0,229
1400	9,20	223	1640	7,11	2,09	0,252

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel β = 3°;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
850	3,61	157	1150	15,4	4,50	0,173
850	5,54	87	810	8,5	3,15	0,265
850	7,05	17	370	1,6	1,43	0,338
950	3,61	257	1780	17,7	4,93	0,145
950	5,55	179	1440	12,4	3,96	0,224
950	7,06	103	1000	7,1	2,76	0,285
950	8,35	31	560	2,1	1,55	0,336
1200	3,65	446	3040	19,30	5,24	0,116
1200	5,58	371	2500	16,05	4,30	0,178
1200	7,07	295	2230	12,75	3,85	0,225
1200	8,37	207	1740	8,94	3,05	0,267
1200	9,19	163	1440	7,09	2,49	0,293
1400	3,70	635	4580	20,30	5,83	0,101
1400	5,61	549	3940	17,50	5,00	0,153
1400	7,10	474	3310	15,10	4,20	0,194
1400	8,39	390	2870	12,45	3,65	0,229
1400	9,21	342	2670	10,85	3,40	0,252

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel β = 5°;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
800	3,59	181	1440	17,4	5,59	0,172
800	5,53	116	1050	11,2	4,05	0,265
800	7,01	48	660	4,6	2,56	0,336
800	7,89	3	320	0,3	1,23	0,378
950	3,59	280	2150	19,2	5,90	0,144
950	5,54	213	1740	14,6	4,74	0,223
950	7,03	143	1350	9,7	3,68	0,283
950	8,31	76	930	5,2	2,55	0,335
950	9,20	27	610	1,8	1,67	0,371
1200	3,64	483	3650	20,70	6,25	0,116
1200	5,57	408	3160	17,45	5,40	0,178
1200	7,05	342	2720	14,60	4,65	0,225
1200	8,34	270	2270	11,45	3,90	0,266
1200	9,14	232	2030	9,90	3,48	0,291
1400	3,68	687	5470	21,60	6,89	0,100
1400	5,60	608	4780	19,15	6,00	0,153
1400	7,08	531	4190	16,79	5,27	0,194
1400	8,35	461	3650	14,54	4,60	0,228
1400	9,16	405	3310	12,73	4,16	0,251

Digitized by Google

VI. Versuchsergebnisse für Schrauben mit gewölbtem, 3 cm breiten Profil.

A. Vierflügelige Schraube.

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 747 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ'	1000 μ	λ
800	3,57	126	960	12,2	3,71	0,171
800	5,50	− 2	380	− 0,2	1,46	0,263
950	3,59	225	1570	15,4	4,30	0,145
950	5,51	101	1060	6,9	2,81	0,222
950	6,57	6	660	0,4	1,80	0,264
1200	3,65	427	2730	18,38	4,68	0,116
1200	5,57	289	2220	12,42	3,81	0,178
1200	7,05	153	1690	6,60	2,90	0,225
1200	8,33	18	1010	0,77	1,74	0.265
1400	3,68	640	3780	20,20	4,76	0,101
1400	5,62	499	3280	15,79	4,14	0,154
1400	7,08	350	2730	11,09	3,44	0,194
1400	8,35	202	2070	6,37	2,61	0,228
1400	9,19	108	1610	3,42	2,04	0,251

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 747 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ'	1000 μ	λ
800	3,58	176	1270	17,0	4,95	0,171
800	5,52	64	730	6,2	2,85	0,264
800	6,57	− 20	240	− 2,0	0,95	0,315
950	3,60	296	2050	20,3	5,64	0,145
950	5,54	176	1470	12,0	4,04	0,223
950	7,04	56	930	3,8	2,48	0,283
950	7,91	− 24	440	− 1,7	1,22	0,318
1200	3,66	522	3430	22,40	5,90	0,117
1200	5,58	400	2890	17,15	4,95	0,178
1200	7,06	276	2400	11,82	4,13	0,225
1200	8,35	154	1810	6,61	3,11	0,226
1200	9,19	66	1370	2,85	2,35	0,293
1400	3,71	750	4750	23,60	6,00	0,101
1400	5,62	611	4120	19,30	5,20	0,153
1400	7,09	502	3770	15,85	4,76	0,194
1400	8,37	379	3030	11,95	3,84	0,229
1400	9,17	297	2740	9,37	3,46	0,251

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 3^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
800	3,61	212	1620	20,7	5,90	0,173
800	5,55	129	1080	12,6	4,20	0,266
800	7,05	9	440	0,9	1,72	0,338
950	3,63	333	2540	23,0	7,00	0,146
950	5,59	242	2060	16,6	5,68	0,224
950	7,06	129	1470	8,9	4,05	0,284
950	8,35	18	730	1,2	2,03	0,336
950	8,78	− 5	590	− 0,35	1,62	0,353
1200	3,68	580	4260	25,20	7,38	0,117
1200	5,60	497	3670	21,50	6,34	0,178
1200	7,09	392	3180	16,95	5,50	0,226
1200	8,37	280	2640	12,15	4,55	0,267
1200	9,19	193	2150	8,34	3,73	0,293
1400	3,74	817	5930	26,00	7,55	0,102
1400	5,64	737	5200	23,50	6,61	0,154
1400	7,12	640	4700	20,40	5,98	0,194
1400	8,40	533	4210	17,00	5,35	0,230
1400	9,20	465	3910	14,8	4,96	0,251

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 4 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 5^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 22°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ	1000 μ	λ
800	3,61	238	1960	23,3	7,64	0,173
800	5,55	153	1420	15,9	5,54	0,268
800	7,05	56	830	5,4	3,26	0,338
800	7,94	− 11	340	− 1,1	1,34	0,380
950	3,63	365	3060	25,2	8,44	0,146
950	5,57	284	2540	19,6	7,05	0,224
950	7,06	182	1920	12,6	5,30	0,284
950	8,35	94	1370	6,5	3,78	0,336
950	9,19	24	830	1,7	2,30	9,370
1200	3,70	612	5050	26,50	8,72	0,118
1200	5,61	541	4350	23,30	7,54	0,179
1200	7,10	455	3820	19,62	6,61	0,226
1200	8,38	359	3350	15,50	5,80	0,267
1200	9,20	292	2890	12,60	4,99	0,293
1400	3,74	865	6900	27,55	8,79	0,102
1400	5,66	804	6320	25,55	8,02	0,155
1400	7,14	713	5640	22,75	7,18	0,195
1400	8,41	617	5000	19,65	6,34	0,230
1400	9,21	549	4600	17,44	5,83	0,252

Digitized by Google

B. Dreiflügelige Schrauben.

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
800	3,54	97	730	9,3	2,83	0,170
800	5,51	− 10	290	− 0,9	1,16	0,264
1050	3,59	236	1520	13,1	3,37	0,131
1050	5,52	124	1130	6,9	2,51	0,201
1050	7,01	14	590	0,8	1,31	0,255
1200	3,61	338	2080	14,40	3,55	0,115
1200	5,54	226	1710	9,69	2,92	0,177
1200	7,02	108	1220	4,64	2,01	0,223
1200	8,30	− 3	640	− 0,13	1,08	0,264
1350	3,63	459	2740	15,28	3,67	0,103
1350	5,55	342	2300	11,39	3,10	0,157
1350	7,04	224	1860	7,45	2,50	0,199
1350	8,31	107	1370	3,57	1,84	0,235
1350	9,13	24	930	0,80	1,25	0,258

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
800	3,56	137	1030	13,2	3,95	0,171
800	5,51	43	640	4,1	2,45	0,264
800	6,55	− 20	240	− 1,9	0,94	0,336
1050	3,58	296	2050	16,5	4,59	0,130
1050	5,55	200	1610	11,1	3,42	0,202
1050	7,01	106	1170	5,9	2,62	0,255
1050	8,30	2	540	0,1	1,20	0,332
1200	3,63	407	2840	17,39	4,85	0,116
1200	5,55	316	2350	13,50	4,00	0,177
1200	7,02	119	1910	8,43	3,25	0,224
1200	8,31	112	1370	4,80	2,34	0,265
1200	9,13	45	980	1,94	1,67	0,291
1350	3,65	539	3720	17,95	5,00	0,103
1350	5,56	442	3180	14,72	4,28	0,157
1350	7,05	330	2740	11,00	3,68	0,199
1350	8,33	243	2250	8,12	3,03	0,235
1350	9,14	171	1860	5,73	2,50	0,258

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel β = 3°;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
800	3,56	176	1420	16,9	5,48	0,171
800	5,51	95	980	9,2	3,77	0,264
800	7,01	6	490	0,6	1,99	0,336
1050	3,61	338	2740	18,8	6,09	0,131
1050	5,54	266	2300	14,8	5,01	0,202
1050	7,02	182	1860	10,5	4,13	0,255
1050	8,30	96	1270	5,4	2,84	0,302
1050	9,13	32	860	1,8	1,91	0,332
1200	3,63	464	3720	19,80	6,33	0,116
1200	5,55	394	3230	16,80	5,51	0,177
1200	7,05	313	2740	13,40	4,69	0,225
1200	8,33	233	2300	9,94	3,93	0,265
1200	9,14	166	1960	7,13	3,35	0,291
1350	3,66	600	4850	20,00	6,51	0,103
1350	5,58	534	4260	17,80	5,73	0,157
1350	7,05	455	3770	15,20	5,08	0,199
1350	8,34	379	3380	12,62	4,55	0,235
1350	9,15	318	3080	10,62	4,14	0,258

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 3 Flügel; Verstellungswinkel β = 5°;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 ψ	1000 μ	λ
800	3,56	186	1570	17,9	6,03	0,171
800	5,52	116	1130	11,2	4,35	0,264
800	7,01	38	690	3,6	2,65	0,336
800	7,89	− 19	290	− 1,8	1,13	0,378
950	3,59	293	2400	20,0	6,54	0,145
950	5,54	216	1960	14,7	5,34	0,223
950	7,02	143	1520	9,7	4,14	0,282
950	8,30	60	980	4,1	2,67	0,334
950	9,13	3	590	0,2	1,61	0,368
1200	3,63	480	4310	20,50	7,35	0,116
1200	5,56	426	3720	18,20	6,33	0,177
1200	7,05	355	3180	15,20	5,42	0,225
1200	8,33	275	2690	11,75	4,58	0,257
1200	9,14	219	2400	9,38	4,10	0,291
1350	3,68	616	5440	20,70	7,30	0,104
1350	5,58	567	4950	18,85	6,64	0,157
1350	7,06	497	4350	16,60	5,88	0,199
1350	8,34	422	4020	14,05	5,40	0,235
1350	9,15	371	3670	12,40	4,95	0,258

Digitized by Google

C. Zweiflügelige Schrauben.

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = -3^0$;
Barometerstand B = 750 mm; Temperatur T = 20°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ'	1000 μ	λ
800	3,54	76	460	7,3	1,80	0,170
800	5,51	− 4	120	— 0,4	0,47	0,264
1000	3,56	149	860	9,1	2,10	0,136
1000	5,51	74	560	4,5	1,39	0,211
1000	7,01	− 7	220	− 0,4	0,54	0,268
1200	3,59	244	1250	10,45	2,15	0,114
1200	5,53	169	1000	7,23	1,72	0,176
1200	7,01	87	710	3,75	1,22	0,223
1200	8,30	7	320	0,32	0,54	0,264
1400	3,61	364	1740	11,42	2,19	0,099
1400	5,55	282	1390	8,87	1,76	0,152
1400	7,03	198	1150	6,24	1,45	0,192
1400	8,32	117	860	3,70	1,08	0,249
1400	9,14	66	610	0,21	0,77	0,227

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 0^0$;
Barometerstand B = 752 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ'	1000 μ	λ
800	3,54	97	660	9,3	2,55	0,169
800	5,51	32	370	3,1	1,41	0,264
800	6,56	− 15	120	− 1,4	0,47	0,314
1000	3,56	181	1100	11,0	2,70	0,136
1000	5,54	116	880	7,1	2,16	0,212
1000	7,00	46	560	2,8	1,38	0,268
1000	7,87	2	320	0,1	0,78	0,305
1200	3,61	286	1690	12,15	2,88	0,115
1200	5,51	226	1400	9,65	2,38	0,176
1200	7,01	153	1100	6,51	1,88	0,224
1200	8,35	80	780	3,40	1,34	0,266
1200	9,11	35	510	1,49	0,88	0,290
1400	3,63	409	2280	12,80	2,86	0,099
1400	5,55	347	1930	10,80	2,42	0,152
1400	7,04	282	1690	8,83	2,12	0,192
1400	8,33	207	1390	6,48	1,75	0,227
1400	9,12	155	1150	4,86	1,44	0,249

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 3^0$;
Barometerstand B = 754 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ'	1000 μ	λ
800	3,56	120	860	11,6	3,31	0,171
800	5,51	64	610	6,2	2,37	0,264
800	7,01	3	240	0,3	0,95	0,336
1000	3,59	207	1440	12,7	3,55	0,137
1000	5,53	158	1200	9,7	2,95	0,211
1000	7,02	103	930	6,3	2,30	0,268
1000	8,30	39	560	2,4	1,39	0,316
1000	9,14	− 4	270	− 0,3	0,66	0,349
1200	3,61	317	1880	13,58	(3,22)*	0,115
1200	5,54	268	1540	11,45	(2,65)*	0,176
1200	7,04	213	1300	9,12	(2,22)*	0,224
1200	8,32	149	980	6,38	(1,68)*	0,265
1200	9,15	113	760	4,85	(1,30)*	0,292
1400	3,63	443	2960	13,95	(3,74)*	0,099
1400	5,57	415	2620	(13,05)*	(3,30)*	0,152
1400	7,05	355	2270	(11,20)*	(2,86)*	0,193
1400	8,34	301	1980	(9,49)*	(2,50)*	0,228
1400	9,15	255	1690	(8,02)*	(2,13)*	0,250

*) Vermutlich falsch. Am Schluß dieser Messung stellte sich heraus, daß sowohl der Kardan K_2 wie K_3 gebrochen waren.

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm; 2 Flügel; Verstellungswinkel $\beta = 5^0$;
Barometerstand B = 754 mm; Temperatur T = 19°.

n Umdr. pro Min.	v m/sec	P g	M cm g	1000 φ'	1000 μ	λ
800	3,56	131	1050	12,6	4,05	0,171
800	5,51	85	760	8,2	2,92	0,264
800	7,02	30	420	2,9	1,61	0,336
950	3,59	202	1590	13,8	4,35	0,145
950	5,53	163	1300	11,1	3,55	0,222
950	7,03	103	1000	7,0	2,75	0,283
950	8,30	49	660	3,4	1,81	0,334
950	9,14	14	420	0,9	1,14	0,368
1200	3,61	338	2620	14,45	4,50	0,115
1200	5,54	300	2330	12,80	4,00	0,177
1200	7,05	255	1990	10,90	3,40	0,225
1200	8,31	196	1690	8,40	2,90	0,265
1200	9,15	163	1490	7,00	2,55	0,292
1400	3,64	459	3740	14,42	4,70	0,100
1400	5,57	436	3500	13,75	4,40	0,152
1400	7,05	392	3110	12,35	3,91	0,193
1400	8,35	348	2860	10,95	3,60	0,228
1400	9,16	307	2620	9,69	3,30	0,251

Digitized by Google

VII. Ergebnisse der Standversuche.

Ebenes Profil; Breite b = 6 cm.

—3°			0°			3°			5°		
n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g
4 Flügel											
816	249	1590	816	307	2150	816	354	2750	816	383	3330
1020	402	2500	1020	475	3360	1020	554	4460	1020	610	5250
1305	651	4060	1224	695	4920	1224	800	6440	1224	862	7620
1428	790	4920	1428	946	6800	1428	1083	8760	1326	1020	8990
1000 ψ = 27,9			1000 ψ = 33,4			1000 ψ = 38,3			1000 ψ = 41,8		
1000 μ = 7,9			1000 μ = 10,0			1000 μ = 12,91			1000 μ = 15,2		
3 Flügel											
816	221	1360	816	263	1920	816	305	2450	816	320	2750
1020	347	2170	1020	425	3030	1020	483	3860	1020	504	4360
1224	509	3130	1224	609	4340	1224	694	5580	1224	709	6240
1428	687	4290	1428	830	5850	1428	935	7550	1428	976	8560
1000 ψ = 24,4			1000 ψ = 29,6			1000 ψ = 33,6			1000 ψ = 35,2		
1000 μ = 6,36			1000 μ = 8,60			1000 μ = 11,2			1000 μ = 12,5		
2 Flügel											
816	171	1010	816	197	1310	816	231	1740	816	234	2020
1020	271	1610	1020	307	2120	1020	365	2880	1020	381	3230
1224	391	2270	1224	444	3030	1224	522	4090	1224	548	4650
1428	532	3180	1428	606	4190	1428	711	5500	1428	737	6360
1000 ψ = 19,1			1000 ψ = 21,6			1000 ψ = 22,5			1000 ψ = 26,3		
1000 μ = 4,73			1000 μ = 6,28			1000 μ = 8,25			1000 μ = 9,34		

Ebenes Profil; Breite b = 4,5 cm.

—3°			0°			3°			5°		
n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g
4 Flügel											
816	247	1560	816	294	2120	816	315	2730	816	341	3130
1020	405	2420	1020	467	3380	1020	520	4340	1020	556	4950
1224	582	3530	1224	677	4850	1224	745	6110	1224	794	7110
1428	793	4850	1428	925	6660	1428	1023	8530	1378	1005	9090
1000 ψ = 23,7			1000 ψ = 27,6			1000 ψ = 30,4			1000 ψ = 32,3		
1000 μ = 5,88			1000 μ = 7,99			1000 μ = 10,12			1000 μ = 11,6		
3 Flügel											
816	207	1290	816	239	1690	816	265	2240	816	281	2450
1020	323	1940	1020	370	2650	1020	428	3510	1020	444	3920
1224	465	2850	1224	544	3820	1224	612	4970	1224	638	5580
1428	648	3960	1428	754	5370	1428	836	6800	1428	880	7750
1000 ψ = 18,7			1000 ψ = 21,9			1000 ψ = 24,55			1000 ψ = 25,9		
1000 μ = 4,65			1000 μ = 6,21			1000 μ = 8,20			1000 μ = 9,18		
2 Flügel											
816	159	1010	816	185	1360	816	191	1560	816	207	1870
1020	249	1560	1020	291	2070	1020	317	2520	1020	327	2930
1224	359	2270	1224	417	2930	1224	458	3680	1224	474	4300
1428	501	3180	1428	564	4140	1428	621	5100	1428	642	5700
1000 ψ = 14,8			1000 ψ = 16,95			1000 ψ = 18,75			1000 ψ = 19,2		
1000 μ = 3,79			1000 μ = 4,78			1000 μ = 6,07			1000 μ = 6,91		

Digitized by Google

Ebenes Profil; Breite b = 3 cm.

−3°			0°			3°			5°		
n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g
4 Flügel											
816	186	1240	816	223	1540	816	229	1890	816	250	2200
1020	302	1940	1020	349	2550	1020	376	3100	1020	386	3510
1275	475	3000	1275	554	4010	1275	590	4770	1224	559	5070
1428	602	3810	1428	696	5070	1428	727	6140	1428	754	6950
1000 φ' = 17,7			1000 φ' = 20,4			1000 φ' = 21,7			1000 φ' = 22,9		
1000 μ = 4,52			1000 μ = 6,00			1000 μ = 7,25			1000 μ 8,33		
3 Flügel											
816	151	930	816	167	1240	816	177	1490	816	188	1640
1020	235	1490	1020	272	1940	1020	288	2400	1020	288	2600
1224	340	2140	1224	392	2850	1224	413	3460	1224	418	3760
1428	476	3000	1428	545	3910	1428	565	4720	1428	571	5130
1000 φ' = 13,6			1000 φ' = 15,7			1000 φ' = 16,5			1000 φ' = 17,0		
1000 μ = 3,44			1000 μ = 4,56			1000 μ = 5,54			1000 μ = 6,13		
2 Flügel											
816	111	657	816	122	859	816	127	1060	816	131	1210
1020	174	1110	1020	195	1413	1020	206	1715	1020	210	1868
1275	274	1665	1275	306	2170	1275	328	2625	1275	330	2980
1428	348	2170	1428	390	2830	1428	400	3380	1428	420	3735
1000 φ' = 10,3			1000 φ' = 11,5			1000 φ' = 12,1			1000 φ' = 12,35		
1000 μ = 2,55			1000 μ = 3,34			1000 μ = 4,03			1000 μ = 4,5		

Gewölbtes Profil; Breite b = 6 cm.

−3°			0°			3°			5°		
n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g
4 Flügel											
800	362	1960	800	404	2500	800	446	3180	800	496	3650
1000	567	3040	1000	651	3920	1000	720	4950	1000	790	5930
1200	830	4310	1200	945	5780	1200	1050	7350	1200	1122	8750
1400	1118	5930	1400	1290	7840	1400	1417	10050	1350	1428	1110
1000 φ' = 38,2			1000 φ' = 43,7			1000 φ' = 48,3			1000 φ' = 54,0		
1000 μ = 8,30			1000 μ = 10,8			1000 μ = 13,9			1000 μ = 16,5		
3 Flügel											
800	296	1620	800	339	2060	800	367	2690	800	394	3080
1050	526	2940	1050	585	3720	1050	645	4610	1000	620	4950
1200	690	3820	1200	785	4950	1200	855	6130	1200	891	7150
1350	875	4900	1350	985	6320	1350	1082	7700	1350	1134	9020
1000 φ' = 32,1			1000 φ' = 34,3			1000 φ' = 38,0			1000 φ' = 40,8		
1000 μ = 7,20			1000 μ = 8,95			1000 μ = 11,07			1000 μ = 13,29		
2 Flügel											
800	231	1200	800	260	1550	750	260	1740	800	313	2320
1000	372	1940	1000	407	2430	950	423	2920	950	433	3210
1200	525	2670	1250	633	3800	1200	664	4340	1200	690	5070
1400	745	3660	1400	806	5020	1400	885	6000	1400	936	7100
1000 φ' = 23,3			1000 φ' = 26,0			1000 φ' = 29,6			1000 φ' = 30,7		
1000 μ = 4,92			1000 μ = 6,34			1000 μ = 8,2			1000 μ = 9,78		

Digitized by Google

Gewölbtes Profil; Breite b = 4,5 cm.

— 3°			0°			3°			5°		
n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g
4 Flügel											
800	346	1710	800	378	2300	800	409	2980	800	425	3330
1000	525	2840	1000	599	3680	950	572	4210	950	604	4850
1200	761	4110	1200	876	5450	1200	940	6620	1200	975	7650
1400	1044	5690	1400	1187	7360	1400	1285	9020	1400	1380	10720
1000 φ' = 32,4			1000 φ' = 36,7			1000 φ' = 39,8			1000 φ' = 41,8		
1000 μ = 7,05			1000 μ = 9,23			1000 μ = 11,2			1000 μ = 13,2		
3 Flügel											
800	270	1420	800	304	1810	800	336	2400	800	346	2685
1000	425	2300	1000	483	3040	1000	515	3820	1000	550	4365
1200	625	3280	1200	692	4260	1200	765	5545	1200	792	6320
1350	782	4165	1350	886	5540	1350	960	7100	1350	1004	8145
1000 φ' = 26,5			1000 φ' = 29,6			1000 φ' = 32,3			1000 φ' = 33,7		
1000 μ = 5,61			1000 μ = 7,46			1000 μ = 9,51			1000 μ = 10,89		
2 Flügel											
800	194	1000	800	210	1200	800	236	1690	800	241	1840
950	283	1400	950	304	1840	950	330	2280	950	341	2670
1200	451	2230	1200	504	2820	1200	540	3650	1200	561	4285
1400	620	2920	1400	678	3845	1400	730	5252	1400	776	6000
1000 φ' = 19,5			1000 φ' = 21,5			1000 φ' = 23,4			1000 φ' = 24,0		
1000 μ = 3,86			1000 μ = 4,83			1000 μ = 6,31			1000 μ = 7,33		

Gewölbtes Profil; Breite b = 3 cm.

— 3°			0°			3°			5°		
n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g	n Umdr. pro Min.	P g	M cm g
4 Flügel											
800	244	1370	800	275	1810	800	286	2110	800	302	2450
950	359	1960	950	396	2640	950	401	3080	950	433	3480
1200	575	3140	1200	626	4160	1200	644	4850	1200	685	5390
1400	790	4260	1400	869	5600	1400	890	6460	1400	941	7550
1000 φ' = 24,7			1000 φ' = 27,1			1000 φ' = 27,9			1000 φ' = 29,7		
1000 μ = 5,37			1000 μ = 7,02			1000 μ = 8,4			1000 μ = 9,6		
3 Flügel											
800	202	1120	800	208	1520	800	218	1810	800	223	1910
1050	344	2060	1050	375	2600	1050	386	3230	950	323	2790
1200	449	2600	1200	485	3430	1200	511	4160	1200	517	4410
1350	580	3380	1350	616	4260	1350	648	5340	1350	664	5740
1000 φ' = 19,4			1000 φ' = 20,6			1000 φ' = 21,7			1000 φ' = 22,1		
1000 μ = 4,47			1000 μ = 5,77			1000 μ = 7,01			1000 μ = 7,62		
2 Flügel											
800	139	710	800	144	960	800	155	1150	800	160	1300
1000	218	1100	1000	228	1500	1000	249	1840	950	223	1790
1200	317	1540	1200	333	2030	1200	349	2470	1200	360	2820
1400	432	2030	1400	470	2670	1400	490	3650	1400	501	3940
1000 φ' = 13,6			1000 φ' = 14,2			1000 φ' = 14,9			1000 φ' = 15,4		
1000 μ = 2,61			1000 μ = 3,54			1000 μ = 4,47			1000 μ = 4,85		

Digitized by Google

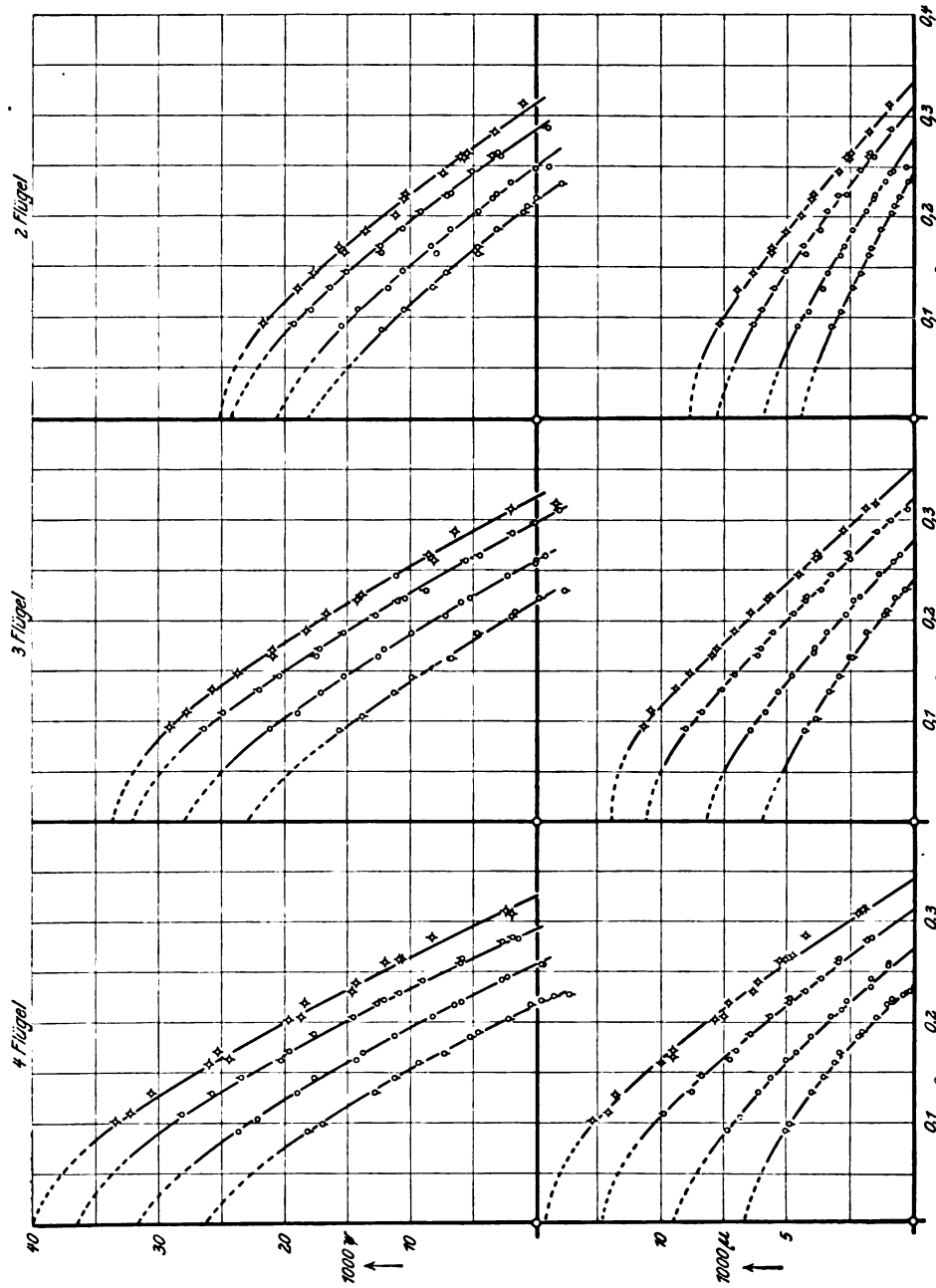


Fig. 18. Ebenes, 6 cm breites Profil. (Zeichenerklärung siehe Fig. 20 und 23.)

Digitized by Google

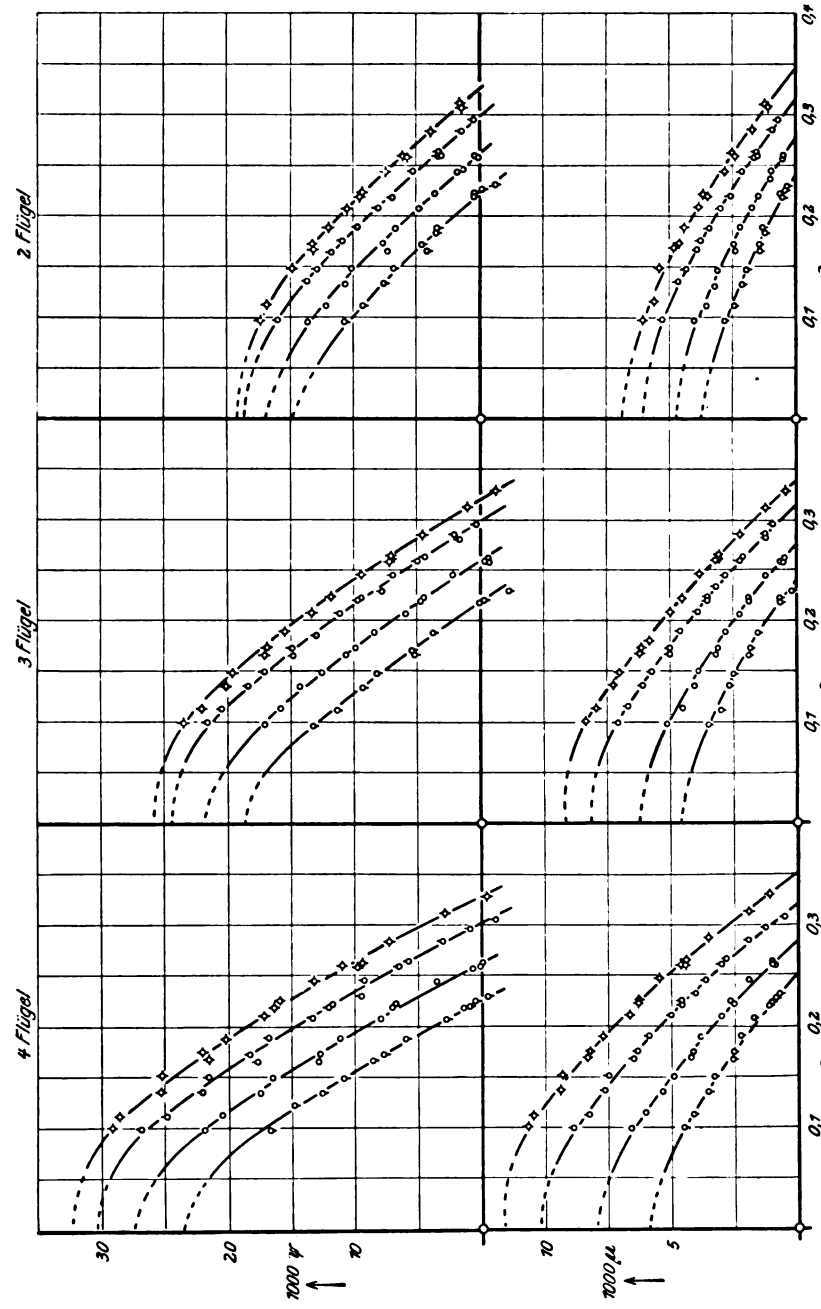


Fig. 19. Ebenes, 4,5 cm breites Profil. (Zeichenerklärung siehe Fig. 20 und 23.)

Digitized by Google

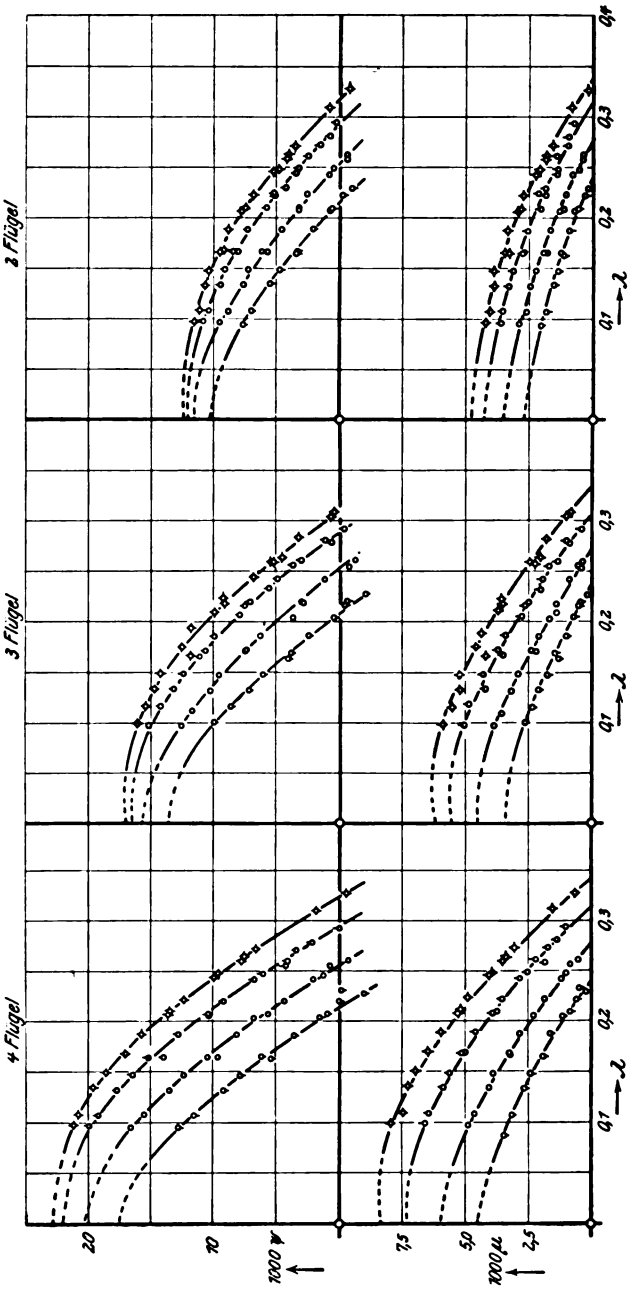


Fig. 20. Ebenes, 3 cm breites Profil.

Digitized by Google

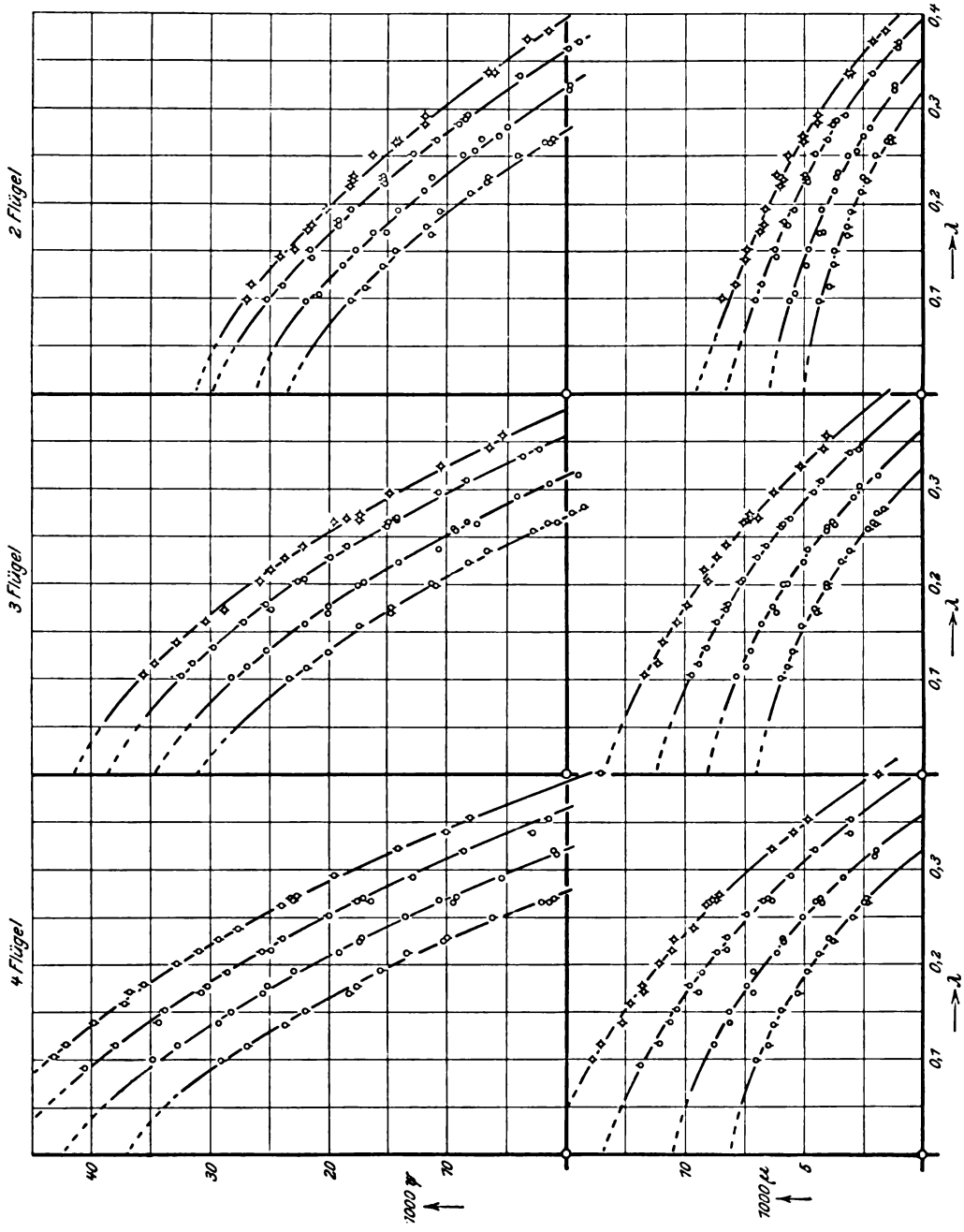


Fig. 21. Gewölbtes, 6 cm breites Profil. (Zeichenerklärung siehe Fig. 20 und 23.)

Digitized by Google

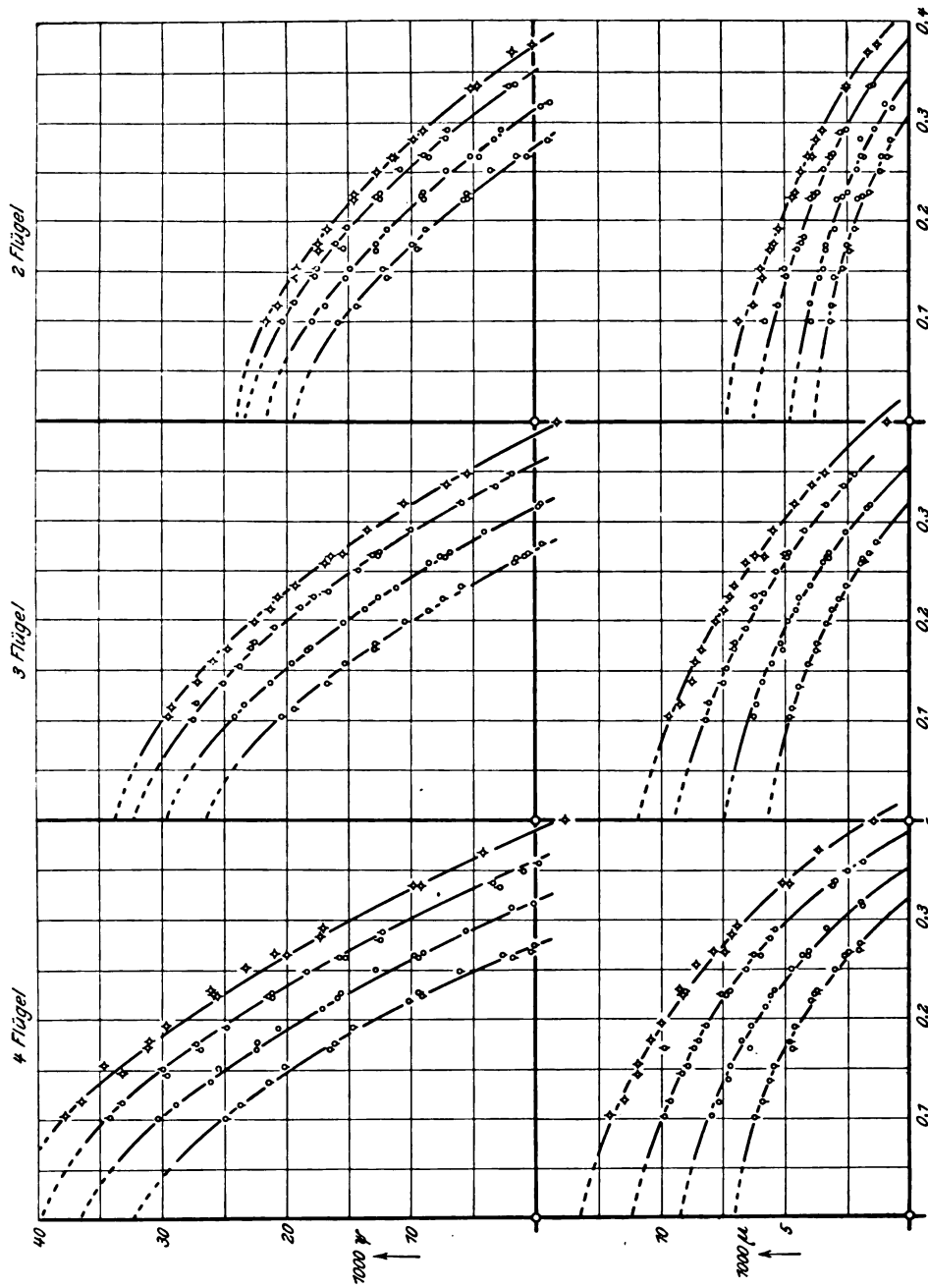


Fig. 22. Gewölbtes, 4,5 cm breites Profil. (Zeichenerklärung siehe Fig. 20 und 23.)

Digitized by Google

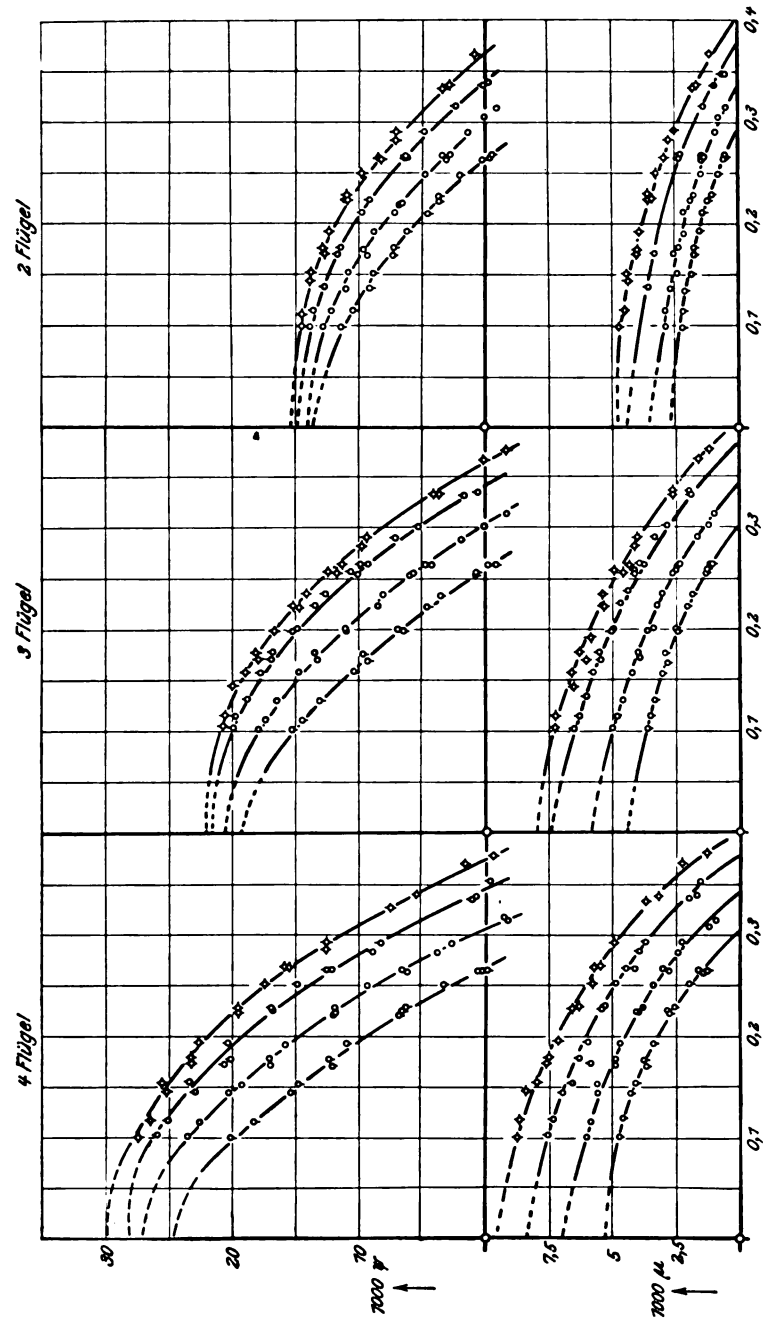


Fig. 23. Gewölbtes, 3 cm breites Profil.

Digitized by Google

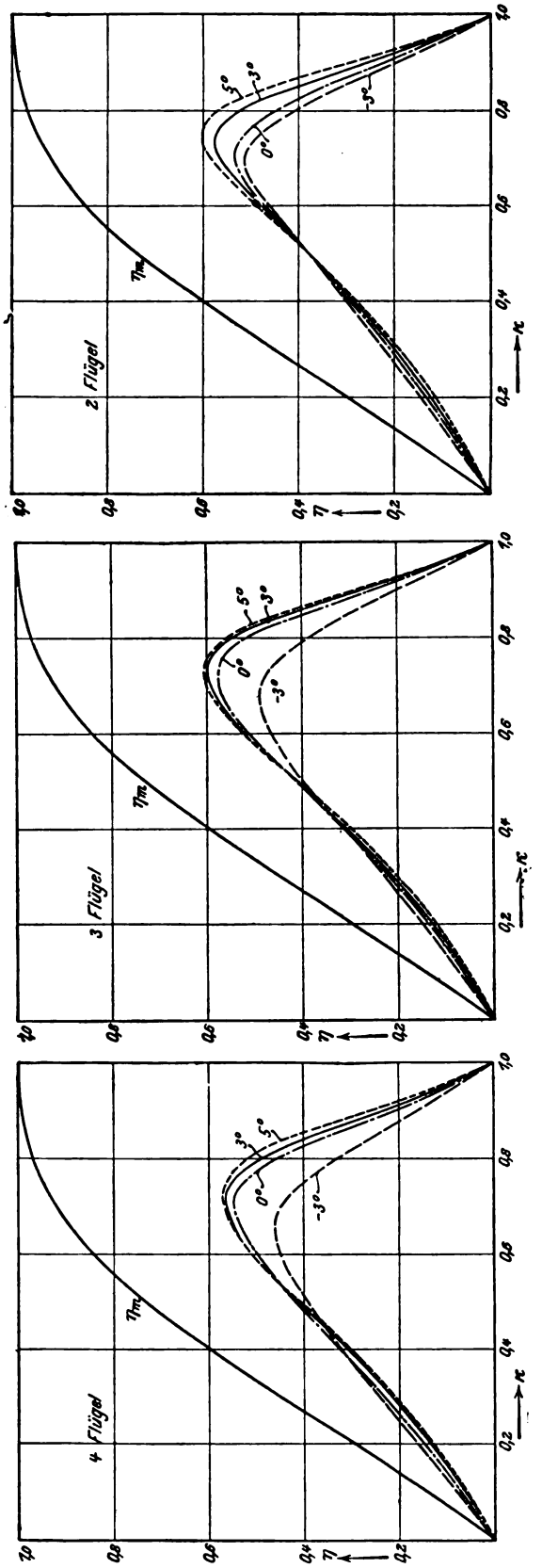


Fig. 24. Wirkungsgrade für ebenes, 6 cm breites Profil.

Digitized by Google

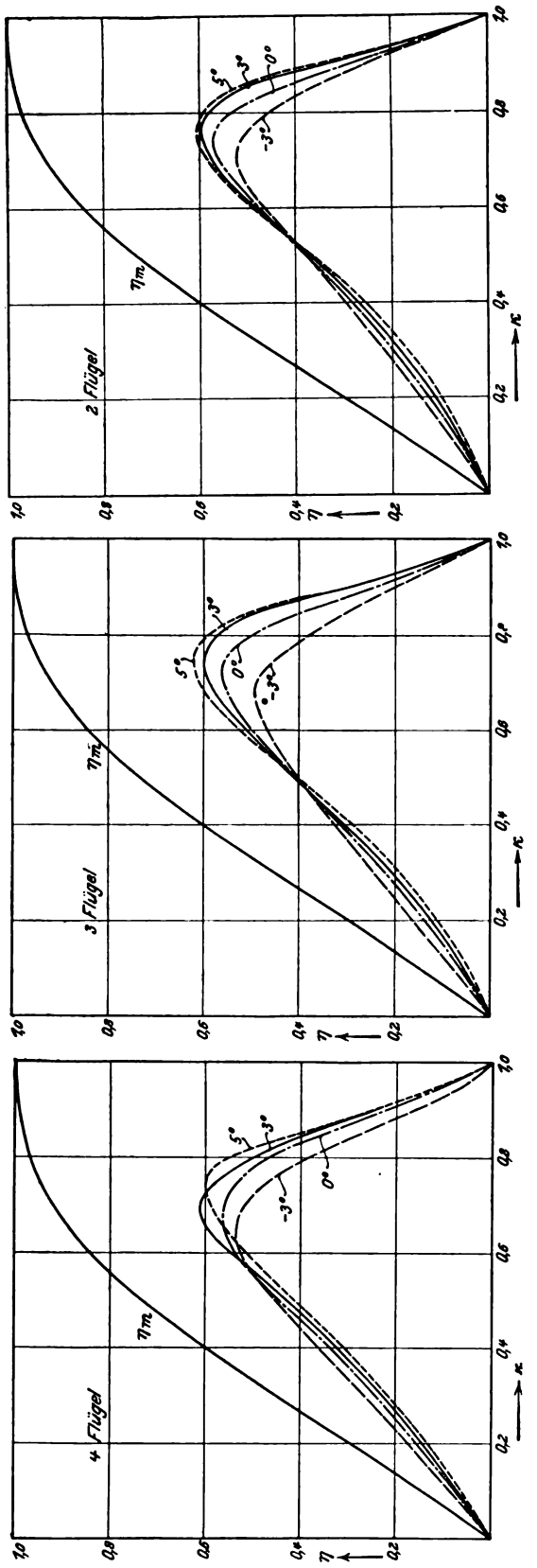


Fig. 25. Wirkungsgrades für ebenes, 4,5 cm breites Profil.

– – – – $\beta = -3^0$
— · — · — $\beta = 0^0$
——— $\beta = 3^0$
– – – – – – $\beta = 5^0$

Digitized by Google

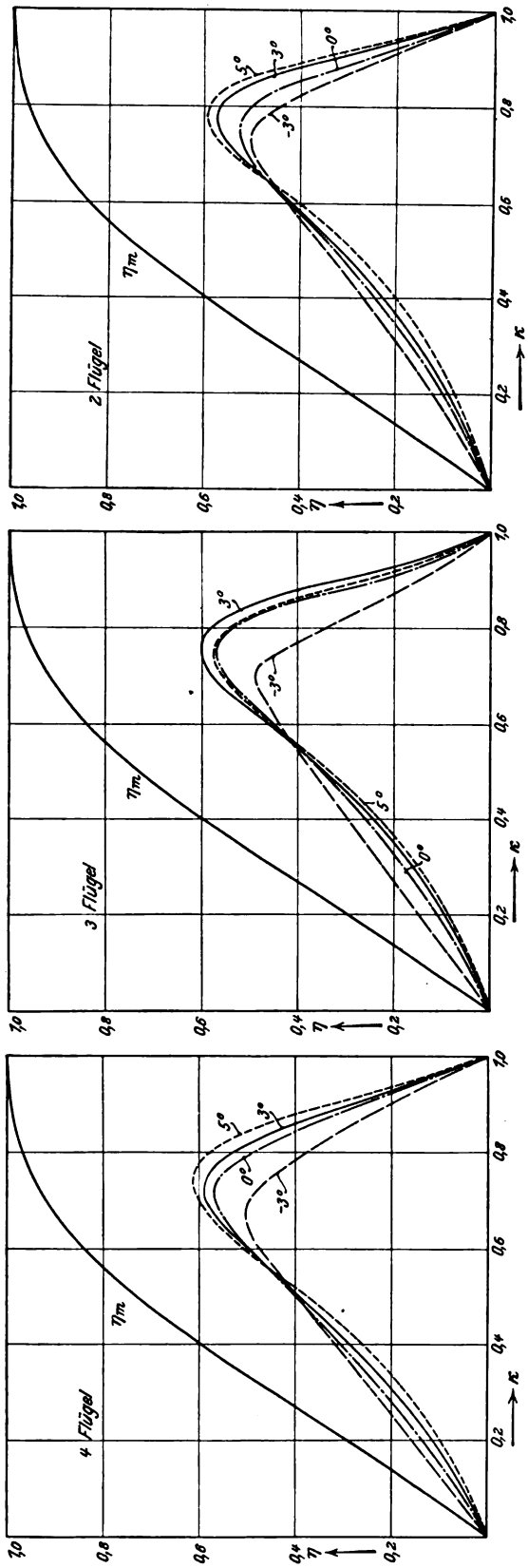


Fig. 26. Wirkungsgrade für ebenes, 3 cm breites Profil.

Digitized by Google

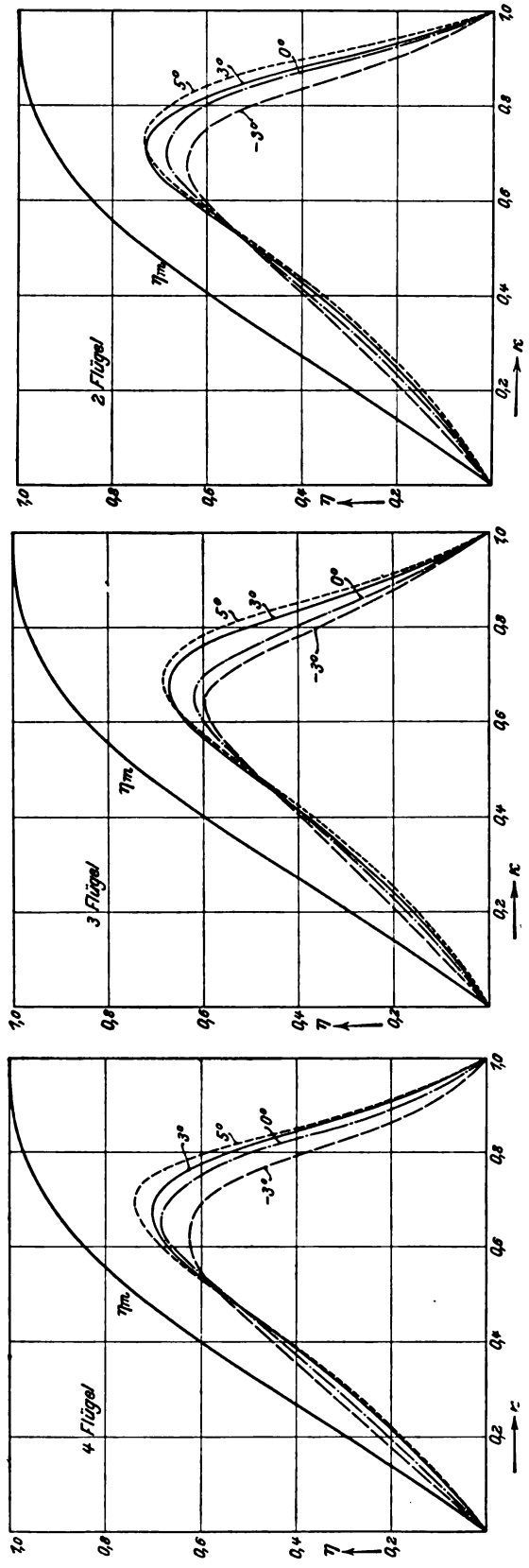


Fig. 27. Wirkungsgrade für gewölbtes, 6 cm breites Profil.

Digitized by Google

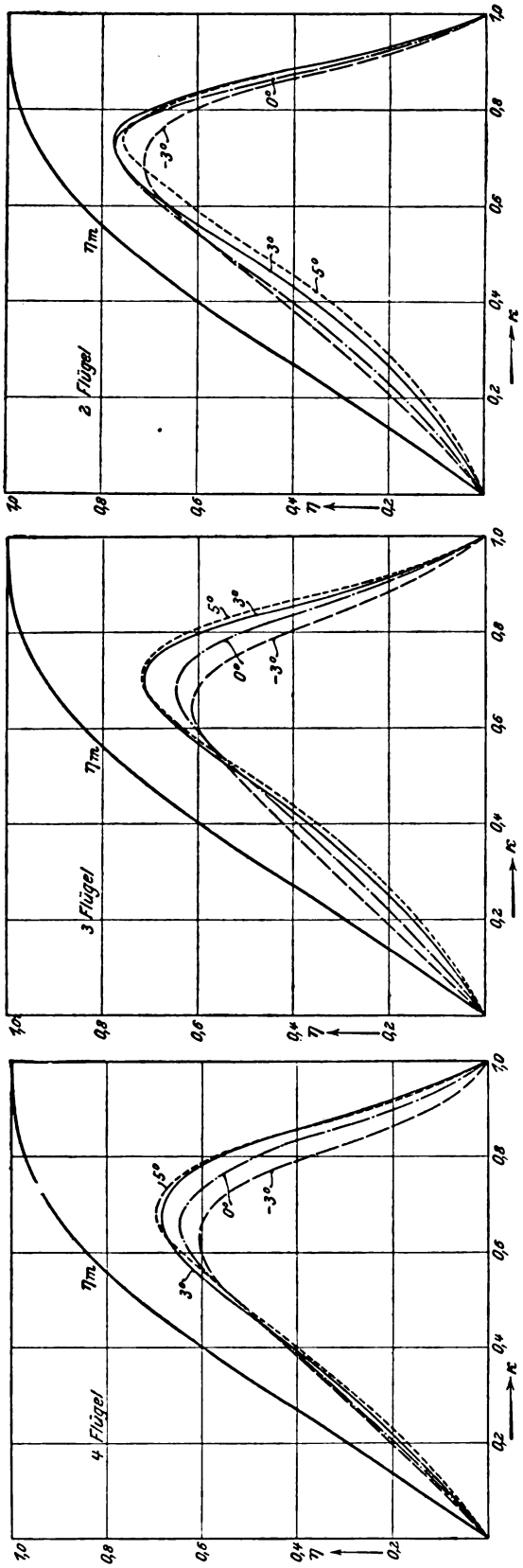


Fig. 28. Wirkungsgrade für gewölbtes, 4,5 cm breites Profil.

Digitized by Google

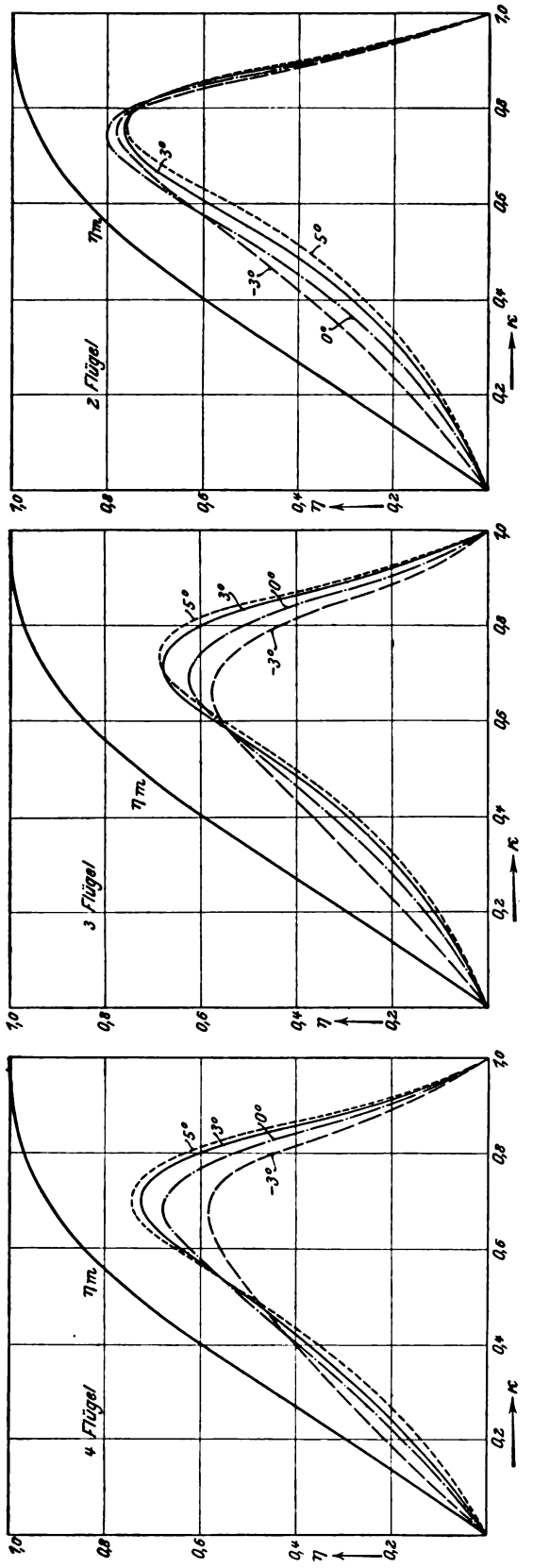


Fig. 29. Wirkungsgrade für gewölbtes, 3 cm breites Profil

Digitized by Google

Über die Beanspruchung von Ballonhüllen unstarrer Luftschiffe.

Von
Major z. D. Prof. Dr.-Ing. h. c. **v. Parseval**-Berlin.

Digitized by Google

Digitized by Google

Als vorliegende Arbeit größtenteils beendet war, erhielt ich Kenntnis von der mathematischen Behandlung des Problems durch Herrn Heyer; ich möchte gleichwohl auf die Veröffentlichung nicht verzichten, da der Stoff von wesentlich anderen Gesichtspunkten behandelt ist und dem praktischen Bedürfnis mehr entsprechen dürfte.

Über Stoffdehnung und Formänderung der Hülle von Pralluftschiffen haben die Herren Dr.-Ing. Rudolf Haas und Dipl.-Ing. Alexander Dietzius im 4. Hefte der „Luftfahrt und Wissenschaft", herausgegeben von J. Sticker (Verlag von Julius Springer), eine wertvolle Untersuchung veröffentlicht, welche über die Resultate der Arbeiten am Siemens-Schuckert-Ballon berichtet und namentlich über das bisher unbearbeitete Gebiet der Ballonhüllenstoffe neues Licht verbreitet. Bezüglich der Einzelheiten sei auf diese Arbeit verwiesen. Der vorliegende Artikel soll nur eine allgemeine Übersicht in leicht verständlicher Form bieten.

Die Beanspruchung der Motorballonhüllen wird hervorgebracht von den Spannungskräften der Gase und von den Kräften, welche die Takelung ausübt. Bei den inneren Spannungskräften der Gase ist zu unterscheiden zwischen dem statischen Druck des Gases, das sind jene Kräfte, welche vom Auftrieb des Gases geweckt werden, und dem Druck, welcher dem Gas durch mechanische Mittel, z. B. durch Gebläse erteilt wird. An jedem Punkte der Gasmasse entspricht der Druck der Summe jener beiden Kräfte.

Der statische Druck des Ballons beruht auf dem Unterschied der Dichtigkeit zwischen Luft und Gas, vermöge dessen das Ballongas sich so verhält, als wenn es ein negatives Gewicht hätte.

Der nach oben gerichtete Auftrieb des Gases erzeugt daher im oberen Teil des Ballons eine Spannung, welche der vertikalen Höhe der Gassäule entspricht.

Bezeichnet A den Auftrieb eines Kubikmeters in Kilogramm, h die Höhe der Gassäule in Meter, so ist der statische Druck

$$p_1 = h \cdot A \text{ in kg auf den Quadratmeter.}$$

Hierzu tritt nun der vom Ventilator hervorgebrachte mechanische Druck, p_2, welcher gleichförmig über die Gasmasse verteilt ist.

Man kann sich sehr leicht ein graphisches Bild von der Druckverteilung im Ballon machen.

Fig. 1 zeigt einen horizontalen Langballon in Seitenansicht und im größten Querschnitt.

Derselbe besitzt bei einem Durchmesser von 15 m einen mechanischen Druck von 30 mm Wassersäule; der Auftrieb des Gases sei A = 1,1 kg, was bei gutem Wasserstoff unter Berliner Verhältnissen etwa zutrifft, so ist der statische Druck an der Oberkante des Ballons

$$p_1 = d \cdot A = 16{,}5 \text{ kg/m}.$$

Digitized by Google

Die mittlere Pressung ist etwa halb so groß. Hierzu tritt der mechanische Druck im Betrage $p_2 = 30$ mm Wasser, an der Unterkante gemessen.

Um den mechanischen Druck in demselben Maßstabe zu zeichnen, in dem wir die Gassäule gezeichnet haben, setzen wir

$$p_2 = h_2 \cdot A, \text{ woraus } h_2 = \frac{p_2}{A}.$$

Wir ziehen nunmehr eine Parallele zu der Horizontalen A A, nämlich B B, und zwar im Abstande h_2 von der Unterkante. Dann ist der Druck an einer beliebigen Stelle der Ballonoberfläche dargestellt durch den senkrechten Abstand der betrachteten Stelle von dem Nullniveau B B_1. Es ist jedoch hervorzuheben, daß diese Drucke nicht vertikal sind, sondern überall senkrecht zu der Oberfläche stehen.

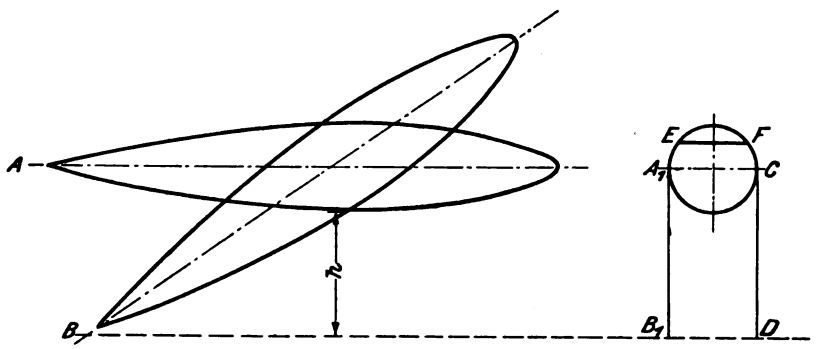


Fig. 1.

Wenn jedoch der Ballon durch Böen getroffen wird, so bleibt er nicht horizontal, sondern kann bei Schwankungen vorübergehend eine ziemlich steile Lager annehmen, in welcher er allerdings nicht lange verharrt. Nun fragt es sich, welche Drucke in solcher Lage entstehen.

Es ist klar, daß der statische Druck hierbei beträchtlich zunimmt, und zwar proportional zu der vertikalen Ausdehnung der Gasmasse. Hierbei ändert sich aber auch der mechanische Druck, weil derselbe stets dem Überdruck des tiefstgelegenen Gasteilchens gleich ist. Denkt man sich einen Langballon stark aufgerichtet, so kann unter Umständen das untere Ende schlaff, also der mechanische Druck Null werden, weil der Ballon infolge der allgemeinen Zunahme des Druckes sich dehnt und der Raum in der Hülle zu groß wird. Der Gesamtdruck ist dann rein statisch. Hierbei ist jedoch Bedingung, daß der Ventilator während der Schwankung nicht Luft nachfördert, daß also das Gewicht der Gas- und Luftmenge konstant bleibt, eine Annahme, die wir bei der kurzen Dauer der Schwankung ohne weiteres machen dürfen.

Der höhere Teil der Hülle hat nun vermehrten Druck, er wird ausgedehnt; dafür zieht sich der tiefere Teil elastisch zusammen, so daß das Volumen der Hülle nahezu konstant bleibt. Dann muß aber auch der mittlere Druck im Ballon konstant sein. Der mittlere Druck entspricht aber dem Druck im Deplacementsschwerpunkt. Streng richtig ist dies nur unter drei Bedingungen: Die Hülle muß aus ganz elastischem Stoff sein, die beiden Enden müssen gleich gestaltet sein, und die Dehnungen müssen relativ unbedeutend sein. Sind diese Bedingungen nicht

Digitized by Google

erfüllt, so sinkt der mittlere Druck etwas, weil die Ausdehnung des oberen Teils stärker ist als die Rückdehnung der unteren Hälfte. Man kann also sagen, daß der mittlere Druck etwas zu hoch gefunden wird, wenn man dem Deplacementsschwerpunkt einen konstanten Druck zuteilt und danach die Nullniveaulinie bestimmt. Dies ist jedoch ohne praktische Bedeutung. Trägt man daher den bekannten mittleren Druck im Deplacementsschwerpunkt vertikal nach unten auf und zieht durch den Fußpunkt dieser Linie eine Horizontale, so gibt der senkrechte Abstand der einzelnen Teile des schräg gestellten Ballons von dieser Nullinie den dort herrschenden Druck an.

Nachdem der im Ballon herrschende Druck bekannt ist, können wir zu den Bestimmungen der Spannungen in der Hülle schreiten.

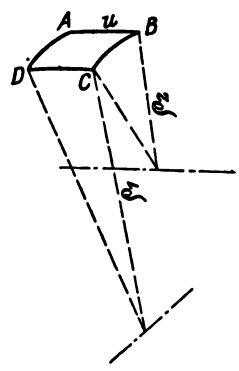


Fig. 2.

In Fig. 2 ist ein quadratisches Stück A B C D, aus einer Ballonhülle herausgeschnitten, dessen Seiten = u sind. Die Fläche dieses Stückes ist demnach $= u^2$ und die von dem Drucke p ausgeübte Kraft $P = u^2 \cdot p$. Beide Seiten des Flächenstückes u^2 haben aber verschiedene Krümmungen, und zwar ist der Krümmungshalbmesser der Seite A B, welche parallel zur Längsachse des Luftschiffes sein möge, ρ_1; der Krümmungshalbmesser der Seite B C, senkrecht zu A B, sei ρ_2; ferner sei die Spannung in der Seite AB S_1 und diejenige der Seite BC S_2; dann besteht die allgemein bekannte Formel $p = \frac{S_1}{\rho_2} + \frac{S_2}{\rho_2}$. Gesucht sind nun die Werte S_1 und S_2, welche die im Stoff herrschende Spannung darstellen. Die Werte von ρ_1 und ρ_2 sind von der Form des Ballons und der Druckverteilung abhängig. Bei einer nicht biegsamen Wand könnten wir die Krümmungshalbmesser ohne weiteres aus der Konstruktionszeichnung entnehmen. Bei einem Ballon ist der Zusammenhang ein komplizierter, jedoch läßt sich mit genügender erster Annäherung die Form des Längsschnittes als bekannt voraussetzen (ρ_1 wird bei der Ausdehnung des Ballons unter Druck etwas kleiner), und der Krümmungsradius des Querschnitts ρ_2 läßt sich, wie weiter unten gezeigt werden wird, aus der Druckverteilung finden. Die Krümmungsradien sind also bekannt.

Aber auch dann sind unendlich verschiedene Wertpaare von S_1 und S_2 möglich, welche die oben angegebenen Gleichungen erfüllen.

Wir brauchen daher noch eine zweite Bedingung zur Feststellung der Beanspruchungen und finden diese darin, daß das Ende des Ballons unter dem Drucke das Bestreben hat, im Querschnitt B C abzureißen. Wäre der Druck gleichförmig verteilt, so wäre die abreißende Kraft $P = p \cdot \rho_2{}^2 \pi$ auf dem Umfange $2\,\rho_2\,\pi$ gleichförmig verteilt. Dabei ist noch zu beachten, daß die Tangente an die Meridian-Kurve des Ballons im Punkte C im Allgemeinen mit der Achse einen Winkel α bildet; somit erhöht sich die Spannung um den Faktor $\frac{1}{\cos \alpha}$, und wir haben

$$S_2 = \frac{P}{2\,\rho_2\,\pi \cdot \cos \alpha} = \frac{p \cdot \rho_2}{2 \cdot \cos \alpha}.$$

Digitized by Google

Für einen Zylinder ist $\alpha = 0$ in $\cos\alpha = 1$, und da hierbei die Umrißlinie geradlinig ist, wird $\rho_1 = \infty$ und $\frac{S_1}{\rho_1} = 0$, und es ist $S_2 = \frac{p \cdot \rho_1}{2}$. Da nun der Druck im Ballon nicht gleichförmig verteilt ist, ist auch die Spannung eine andere.

Die Spannungsermittlung begegnet jedoch Schwierigkeiten. Zunächst müssen wir die Annahme machen, daß äußere Biegungsmomente quer zur Ballonachse nicht stattfinden, und daß nur die parallel zur Achse gerichteten Kraftkomponenten wirksam sind.

Hiernach müssen wir uns den horizontalen Ballon auf seiner ganzen Oberfläche so belastet denken, daß der Auftrieb aufgehoben ist.

Die Verteilung der Spannungen im Umfang wird dann eine solche, daß ihre Resultante mit der Resultante der über den Querschnitt verteilten Längsdruckkräfte zusammenfällt. Wäre dies nicht der Fall, so würden die Längsspannungen der Hülle und die Gasdruckkraft zusammen ein Kräftepaar bilden, das eine Biegung auf den Ballon ausübt. Hierdurch würde aber die Spannungsverteilung in der Hülle so lange geändert, bis das resultierende Biegungsmoment Null geworden ist. Die entsprechende Spannungsverteilung tritt daher jederzeit von selbst ein.

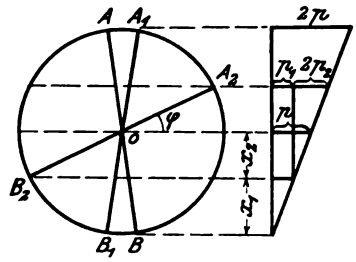


Fig. 3.

Es lassen sich aber die verschiedensten Arten der Spannungsverteilung angeben, die obige Bedingung erfüllen, z. B. wenn man den Querschnitt durch horizontale parallele Ebenen geteilt und den Druck der zwischen ihnen liegenden Gassäule auf den von ihnen abgeschnittenen Teil der Wand übertragen denkt. Dadurch würde aber die Spannung im obersten Punkt des Querschnittes unendlich klein, was offenbar unrichtig ist.

Ein besseres Ergebnis gibt die Annahme, daß die Spannungen sich in der Weise verteilen, daß immer zwei auf einem Durchmesser der Hülle gegenüberliegende Teile zusammen eine entsprechende Lage der Spannungsresultante ergeben.

In dem Mittelpunkt O des Querschnittes seien die Radien $A\,A_1$ und $B\,B_1$ gezogen, und es ist angenommen, daß sich der Gesamtdruck der Belastung der beiden Dreiecke $O\,A\,A_1$ und $O\,B_1\,B_1$ vollständig auf die Umfangsstrecken $A\,A_1$ und $B\,B_1$ überträgt. Nun sei der Querschnitt von einer mittleren Kraft p belastet, die von Null am unteren Rand an gleichförmig bis 2 p am oberen Rand ansteigt. Dann ist in der Höhe x über dem unteren Rand der Druck

$$p_x = \frac{p}{r} \cdot x \ldots .$$

und eine leichte Rechnung ergibt für den Wert der Spannungen: $S = p \cdot r\left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{4}\right)$, wobei das Pluszeichen für den oberen, das Minuszeichen für den unteren Rand gilt. Man bestimmt den Gesamtdruck auf die beiden Dreiecke $A\,A_1\,O$ und $B\,B_1\,O$ und die Lage der Druckresultante. Hieraus finden sich die auf die Linien $A\,A_1$ und $B\,B_1$ übertragenen Kräfte P bzw. P_1. Die Spannungen sind dann

$$S = \frac{P}{A\,A_1} \text{ bzw. } S_1 = \frac{P_1}{B\,B_1}.$$

Digitized by Google

Wir untersuchen noch die Beanspruchung für einen schräg liegenden Durchmesser $A_2 B_2$, wobei wir beachten, daß hier einem konstanten Druck p_1 ein vom Werte Null ab gleichförmig ansteigender Druck übergelagert ist, dessen Mittelwert gleich p_2 sein möge. Dann ist für den gleichförmig verteilten Druck $S_1 = \frac{p_1 \cdot r}{2}$, für den gleichförmig ansteigenden Druck $S_2 = p_2 r \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{4}\right)$, folglich

$$S = S_1 + S_2 = \frac{p_1 \cdot r}{2} + p_2 \cdot r \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{4}\right).$$

Nun entspricht der Druck p_1 der Gassäule x_1, der Druck p_2 der Gassäule x_2 (siehe Fig. 3), und es ist:

$$x_1 = r\,(1 - \sin\varphi), \quad x_2 = r \cdot \sin\varphi,$$

somit ist $p_1 = p\,(1 - \sin\varphi)$, und $p_2 = p \cdot \sin\varphi$, woraus

$$S = p \cdot r \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{4} \sin\varphi\right).$$

Das Pluszeichen gilt für das obere, das Minuszeichen für das untere Ende des Radius.

Die Spannungsänderung auf dem Umfang ist daher proportional dem Sinus des Zentriwinkels.

Die Maxima und Minima liegen hierbei um ½ des Mittelwertes ober- und unterhalb des letzteren und verhalten sich wie 1 : 3.

Es fragt sich nun, ob diese als möglich erkannte Spannungsverteilung auch wirklich zutrifft, und dies hängt von der Elastizität der Hülle ab. Wir dürfen für die Praxis einen homogenen Hüllenstoff annehmen von ziemlich hoher Dehnbarkeit.

Wenn daher Spannungsänderungen nebeneinander auftreten, so werden sie sich auszugleichen suchen; es wird sich also ein Zustand herstellen, in welchem die Änderung der Spannung S in Umfang u, also der Differentialquotient $\frac{dS}{du}$ ein Minimum wird. Am kleinsten wird dieser Quotient aber bei einer konstanten Spannungsänderung. Hierbei müßte die Spannungskurve eine gerade Linie sein und sich aus auf- und absteigenden Geraden zusammensetzen. Dem steht aber die Unmöglichkeit eines Knickes in der Spannungskurve, wie er an den Schnittpunkten der Linien auftreten müßte, entgegen. Wir können daher die Spannungsverteilung nach dem Sinusgesetz als zutreffend annehmen.

Wenn äußere Biegungsmomente auf den Ballon einwirken, so ändert sich die Verteilung der Längsspannungen derart, daß zu der ursprünglichen Spannung eine Kraft hinzutritt, welche dem Abstand von der Biegungsachse proportional ist. Bei kreisrundem Querschnitt ist diese Spannungskurve eine Sinuslinie.

In der Fig. 4 ist ein nur in der Mitte belasteter Ballon dargestellt, dessen überstehendes Ende durch den Auftrieb H auf Biegung beansprucht wird. Die Deformationen treten zuerst am inneren Ende der Spitze bei A B auf. Zu Beginn der Biegung bleibt die übrige Spitze in Form; die Faltenbildung beginnt in dem gefährlichen Querschnitt bei B. Hier treten Druckkräfte auf, bei A Zugkräfte. So-

Digitized by Google

lange die Druckkräfte bei B kleiner sind als die im biegungsfreien Zustand dort vorhandenen Zugspannungen, bleibt auch bei B der Stoff gespannt, und der Ballon hält Form. Sobald aber die Biegungskräfte größer sind als die Zugspannungen, beginnt sichtliche Faltenbildung.

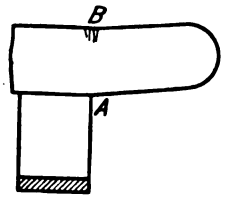


Fig. 4.

Ist der Ballon mit gleichförmigem Druck gefüllt, so ist bei Beginn der Faltenbildung die Spannung unten auf das Doppelte gestiegen; oben ist sie Null geworden. Das Biegungsmoment ist alsdann

$$M = \frac{F \cdot p \cdot d}{4} = \frac{d^3 \pi \cdot p}{16},$$

wo F den Querschnitt, d den Durchmesser, p den Druck im Ballon bedeutet.

Tritt zu dem gleichförmig verteilten Druck noch ein von unten nach oben gleichmäßig ansteigender Druck, so ist die Biegungsfestigkeit nach oben und nach unten verschieden. Da nunmehr die Längsspannungen in der oberen Hälfte der Hülle größer sind als in der unteren, so wird bei der Biegung nach oben das Einknicken später erfolgen als bei einer gleich starken Biegung nach unten.

Bei starker Biegung wird der Ballon sichtlich krumm und plattet sich an der Biegungsstelle etwas ab, die Falten dehnen sich gegen die Mitte zu aus, das Biegungsmoment und der Druck im Ballon wachsen, und die Zugspannungen vereinigen sich auf einen Teil des Umfangs auf der Zugseite. Das Maximum der Biegungsfestigkeit ist hierbei stets kleiner als das Doppelte derjenigen der ersten Faltenbildung

Zusammenfassend können wir sagen:

Der Mittelwert der Längsspannungen wird gefunden aus der Formel $S_1 = \frac{F \cdot p}{u \cdot \cos \alpha}$, wo F den Querschnitt des Ballons, u den Umfang, p den Mittelwert des Druckes, α die Neigung der Tangente des Längsprofils zur Längsachse bedeutet

Bei kreisförmigen Profilen und einem von unten nach oben von Null ab gleichförmig steigenden Gasdruck geht die Spannungsverteilung auf den Umfang mit der Sinuslinie, und zwar in der Weise, daß die Spannungen vom Mittelwert nach unten und oben bis um 50% abweichen.

Bei Biegungen, solange keine Faltenbildung auftritt, bleibt die Summe der Längsspannungen konstant, und die Maximalspannung auf der Zugseite kann bis zum doppelten Betrag des mittleren Wertes der Längsspannung steigen.

Nunmehr können wir zu Bestimmungen der Querspannungen S_2 schreiten, und beginnen zunächst mit dem zylindrischen Querschnitt. Es sei der im allgemeinen nicht kreisförmige Querschnitt in Fig. 1 gegeben. Wir ziehen nun an denselben senkrechte Tangenten bis zum Nullniveau B B_1. Dann ist der Inhalt der von der oberen Ballonkontur und dem Linienzug A_1 B_1 D C begrenzten Figur ein Maß des in A_1 und C senkrecht nach oben auf die Einheit der Ballonlänge wirkenden Druckes P, und da auf jede Seite die Hälfte wirkt, ist $S_2 = \frac{P}{2}$, d. h. auf einen Stoffstreifen von der Breite 1 wirkt die Kraft $\frac{P}{2}$ und mit Berücksichtigung des

Digitized by Google

Hüllengewichtes G h wird

$$S_2 = \frac{P - G_h}{2}.$$

Für die untere Hälfte der Hülle ist der Wert der nach unten gerichteten Kraft gegeben durch den Inhalt des unter dem Ballon liegenden Teiles der Figur. Hierbei bleibt der Auftrieb des Querschnittes, welcher, wie man sieht, als Differenz dieser beiden Drucke gleich dem Inhalt des Ballonquerschnittes auftritt, unausgeglichen. Wir müssen daher die Annahme machen, daß der Körper in A_1 und C durch vertikale Seile gehalten ist. Dort ist dann ein Sprung in den Spannungswerten, und im allgemeinen können die Linien $A_1 B_1$ und C D nicht gleichzeitig Tangenten an die obere und untere Kurve sein.

Die Spannung in jedem oberhalb A C gelegenen Punkt können wir finden, indem wir einen horizontalen Schnitt E F legen. Der Inhalt des zwischen den Vertikalen durch E und F befindlichen Teils der Gesamtfigur, minus Hüllengewicht zwischen E und F, ist ein Maß für die vertikale, nach oben wirkende Kraft P. Die Spannung ist dann $\frac{P}{2 \sin \alpha}$, wobei α den Neigungswinkel der Tangente in E zur Horizontalen bedeutet.

Wir haben diese Rechnung aber durchaus nicht nötig. Denn die Spannung des Stoffes in der zylindrischen Hülle ist bekanntlich konstant. Da der aerostatische Druck vollkommen senkrecht zu den Wänden gerichtet ist, besitzt er keine tangentiale Komponente und kann also keine Vermehrung oder Verminderung der einmal vorhandenen Spannung veranlassen. Lediglich das Eigengewicht der Hülle hat eine praktisch bedeutungslose Veränderung der Spannung zur Folge.

Da nun auf den ganzen Umfang der Satz gilt $\frac{S_2}{p} = \rho$, so ist der Krümmungsradius ρ für jeden Punkt des Umfangs dem Druck umgekehrt proportional. Er ist also an der Stelle des höchsten Druckes im Scheitelpunkt am kleinsten, unten am größten. Mittels dieses Satzes kann man die Kurve aufzeichnen. Es ergibt sich, daß der Ballon in der Vertikalen sich streckt, während die Breite abnimmt, wobei der Gesamtschwerpunkt des Gases sich etwas höher legt. Doch ist die Abweichung vom Kreisquerschnitt bei hohen Drucken unbedeutend.

Die Scheitelkurve läßt sich leicht über die Mitte nach abwärts verlängern. Beim Übergang zur Unterseite am Gurt muß der Zug der Oberseite tangential aufgenommen werden. Die Resultante aus der Zugspannung der Unterseite und derjenigen der Halteseile muß daher die Oberseitenkurve berühren.

Die Unterseite folgt dem gleichen Spannungsgesetz wie die Oberseite. Sie kann entweder so kurz sein, daß die Seile mit der Tangente zur Unterseite einen spitzen Winkel bilden, oder — was oft der Fall ist — sie ist zu lang, und hat die Möglichkeit, sich nach außen zu wölben; dann drücken die Leinen den Ballon ein.

Um die Hauptspannungen zu ermitteln, suchen wir zunächst die Druckverteilung bei der größten erfahrungsmäßig vorkommenden Schrägstellung des Ballons, z. B. bei einer Neigung von $\pm 35^0$; dann bestimmen wir in passend gewählten Querschnitten zunächst die Längsspannungen aus der, der Konstruktionszeichnung entnommenen Umrißkurve und benutzen hierbei die Mittelwerte. Wir kennen

Digitized by Google

somit den Wert $\frac{S_2}{\rho_2}$ und finden aus Gleichung 1 den Wert für $\frac{S_1}{\rho_1}$. Hier ist ρ_1 unbekannt. Setzen wir in erster Annäherung ρ_1 gleich dem Halbmesser des als Kreis gedachten Ballonquerschnitts — was dem Mittelwert von ρ_1 sehr nahe kommt —, so finden wir, da wir den Ballon zu breit angenommen haben, den Spannungswert etwas zu groß; doch ist der Fehler praktisch unbedeutend.

Nach Durchführung der Überschlagsrechnung für den ganzen Ballon kann eine genauere Bearbeitung der höchst beanspruchten Querschnitte unter Aufzeichnung derselben zweckmäßig folgen.

Die Formänderungen des Ballons beim Aufblasen bestehen außer der Querschnittsänderung aus einer Vergrößerung der Durchmesser, die bei der Berechnung wohl in Betracht zu ziehen ist. Die Längsdehnung der Stoffe ist unbedeutend. Am stärksten ist die prozentuale Durchmesserdehnung in der Mitte. Durch die Dickenzunahme wird aber auch eine längere Umrißlinie des Längsschnittes erzeugt, und da die Längsdehnung des Stoffes dem Maß dieser Verlängerung nicht folgen kann, so findet eine merkbare Verkürzung des Ballons statt. Bei Parseval-Luftschiffen wird die Verkürzung noch durch den Einfluß der Takelung vermehrt.

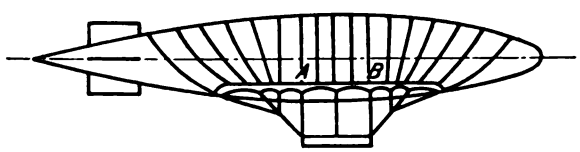


Fig. 5.

Der Einfluß der Takelung auf die Längsspannung ist erheblich. Fig. 5 zeigt die Aufhängung. Das rückwärtige Ende des Schiffes dient zum Tragen der Steuer; es hat wenig überschüssige Tragkraft und kann für die Takelung vernachlässigt werden. Die Gondel ist unter dem Auftriebsmittelpunkt des übrig bleibenden Ballon teils senkrecht aufgehängt.

Auf der Strecke A B ist der Ballon durch vertikale Taue gehalten. Von den Enden der Gondel laufen schräge Taue gegen den Auftriebsmittelpunkt der überstehenden Spitzen, welche den Auftrieb derselben aufnehmen; ihre vertikalen Zugkomponenten sind also dem Auftrieb der Spitzen gleich zu setzen; ihre horizontalen Komponenten üben aber eine zusammendrückende Kraft gegen die Mitte des Ballons. Sie vermindern dadurch die Längsspannungen im Mittelteil und hauptsächlich hierdurch ist das Maß des für den Betrieb nötigen Innendruckes gegeben. Bei der üblichen Aufhängung genügt ein Druck von ca. 10 mm Wasser an der Unterkante, um ein Aufbiegen der Spitzen zu verhüten. Hierbei ist aber nur eine geringe Längsspannung im Mittelteil vorhanden, und da von den Längsspannungen die Biegungsfestigkeit des Körpers abhängt, so ist für den Betrieb ein höherer Druck notwendig, erfahrungsgemäß 20—25 mm. Die vollen Längsspannungen treten daher nur an den überstehenden Enden auf.

Hier ist es auch, wo Biegungsbeanspruchungen durch den Auftrieb in Betracht zu ziehen sind.

Außer den Biegungen wirkt aber hier noch die Schubkraft, welche sehr eigentümliche Formänderungen bewirkt. Der Stoff zieht sich schräg, und die ganze Spitze wird verkrümmt, indem sich die obere Kante nach oben ausbaucht, die untere aber streckt. Deshalb sind über den Ballon schräglaufende, starke Bänder gelegt,

Digitized by Google

die als eine Fortsetzung der Takelung über die Ballonhülle erscheinen. Diese verhindern das Schrägziehen der Stoffbahnen und nehmen die Schubkräfte auf. Dadurch verschwindet die Deformation und die Schiffe erhalten eine überraschend schöne Form. Es zeigt sich, was auch die Theorie ergibt, daß Biegungskräfte (die man nicht vermeiden kann) für sich allein keine merkliche Deformation hervorbringen, wenn die Schubkräfte aufgenommen sind.

Die Schutzbänder erstrecken sich aber auch auf den Mittelteil des Ballons, wo im allgemeinen keine wesentlichen Schubkräfte vorhanden sind. Dort haben sie den Zweck, das Weiterreißen entstehender Längsrisse zu verhindern.

So sicher der angewendete starke Diagonalstoff bei kleinen Verletzungen auch ist, so ist doch unter Umständen der im Ballon herrschende statische Gasdruck hinreichend, ein Weiterreißen herbeizuführen, sobald ein Riß, wie es bei mechanischen Verletzungen vorgekommen ist, eine gewisse Länge überschreitet. Der Ballon kann dann in einem Moment auf der ganzen Länge platzen. Dies wird durch die Schutzbänder verhindert.

Es ist noch die Frage zu erörtern, inwieweit die Beanspruchungen durch die Widerstände bei der Fahrt beeinflußt werden. Der Antrieb der Schrauben darf z. B. auf maximal 1200 kg veranschlagt werden, wovon ca. 900 kg auf die Widerstände des Ballons zu rechnen sind. Hiervon ist nach den Untersuchungen der Göttinger Modellversuchsanstalt ein erheblicher Teil Reibung. Da sich aber diese Reibung auf eine Oberfläche von mehr als 3000 qm verteilt, so kommt keine für die Festigkeit erhebliche Kraft auf den Quadratmeter zustande.

Nicht zu vernachlässigen dagegen ist die Veränderung des Außendruckes durch den Fahrtwiderstand. Rings um den Hauptteil des Ballons entsteht nämlich ein Unterdruck, der eine merkliche Erhöhung der Druckdifferenz zwischen Außen und Innen herbeiführt und die Beanspruchungen steigert. Derselbe beträgt nach den oben genannten Untersuchungen — siehe Jahrbuch der Motorluftschiff-Studiengesellschaft 1911/1912, S. 106 und 107 — bei dem günstigsten Modell $\frac{v^2 \cdot \gamma}{2g} \cdot 0{,}17$, die für $v = 20\,\text{m/sec} = 4{,}3\,\text{mm}$ Wasser (bei einem Wert von $\gamma/g = {}^1/_8$).

Bei ungünstigen Formen kann dieser Unterdruck noch dreimal größer sein. Er umgibt gerade den stärksten Teil des Ballons und hat dort eine Erhöhung der Beanspruchung um ca. 12% zur Folge; er bedarf also sehr wohl der Berücksichtigung.

Überdruck tritt in erheblichem Maße nur an der Stirnseite des Ballons auf. Um Einbeulungen zu verhindern, kann man entweder vorn eine scharf zulaufende Spitze anwenden oder dem Ballon eine starre Schutzhaube geben, wenn man nicht vorzieht, den Innendruck so hoch zu wählen, daß Einbeulungen ausgeschlossen sind. Zu diesem Zweck ist theoretisch ein Innendruck nötig gleich $\frac{v^2 \cdot \gamma}{2g}$, in der Praxis aber muß der Druck um etwa 50% höher sein, damit bei Böen keine Einbeulungen entstehen. Bei einer Geschwindigkeit $v = 20$ m wäre dieser Innendruck somit 25 mm bzw. 37,5 mm.

In der horizontalen Lage des Ballons würde hiernach ein Überdruck von 30 mm an der Unterkante erforderlich; wird mit abwärts geneigter Spitze gefahren, noch etwas mehr. Bei großen Schiffen von 20 und mehr Sekundenmetern Geschwindigkeit werden allgemein Schutz-Hauben angewendet.

Digitized by Google

Digitized by Google

Der Nebelbeobachtungsdienst der Luft-Fahrzeug-Gesellschaft m. b. H.

Von

Dr. **Hermann Rotzoll**-Bitterfeld.

Digitized by Google

Digitized by Google

In den letzten Jahren, in denen die Luftfahrt ihren enormen Aufschwung genommen hat, ist auch der Wetterdienst mehr und mehr auf ihren Bedarf zugeschnitten worden. Das Hauptmerkmal dieser Wandlung bildet der Luftfahrerwarnungsdienst, der vom Direktor des Königlich Preußischen Aeronautischen Observatoriums in Lindenberg, Herrn Geh. Regierungsrat Professor Dr. Aßmann, ins Leben berufen wurde. Infolge dieses Fortschrittes kann heute jeder Luftfahrer vor einem Aufstieg über die Wetterlage im allgemeinen und die Windverhältnisse und Gewitteraussichten im speziellen so gut wie nur irgend möglich im Klaren sein.

Ein besonders gefährlicher Feind der Luftfahrt ist nun noch der Nebel, und gerade Kraftluftfahrzeuge haben unter diesem Gegner im allgemeinen mehr zu leiden als Freiballone; denn erstens fahren sie relativ zur Erde gewöhnlich schneller, zweitens besitzen sie eine erheblich größere Empfindlichkeit gegen ein Berühren fester Gegenstände, weiterhin repräsentieren sie meist einen höheren Wert, und endlich laufen sie stets mehr oder weniger Gefahr, wenn sie die schützende Halle nicht zu erreichen vermögen. All diese Gründe veranlaßten die Luft-Fahrzeug-Gesellschaft dazu, einen Nebelbeobachtungsdienst einzurichten und so den Versuch zu machen, die Gefahren des Nebels zu verringern.

Hierzu war es zunächst notwendig, die übliche Methode, nach der die Stärke des Nebels durch die Ziffern 0, 1 und 2 ausgedrückt wird, etwas abzuändern. Der Luftschiffführer muß in erster Linie möglichst genau wissen, wie weit er dicht über der Erde sehen kann, und es erwies sich deshalb als vorteilhafter, diese „Sichtigkeitsdistanz" einzuführen und außerdem nicht nur in drei, sondern in 8 bis 10 Graden. Für die Ausdehnung des Beobachtungsnetzes war maßgebend, daß die von Bitterfeld aus stattfindenden Werkstatt- und Probefahrten gewöhnlich nur in die weitere Umgebung führen; infolgedessen konnte vorerst eine geringe Anzahl von Stationen in mäßiger Entfernung genügen. Dagegen war es wünschenswert, daß die Beobachtungen nicht nur im Bedarfsfalle ausgeführt würden, sondern regelmäßig, weil so die Aussicht bestand, eventuell nach einiger Zeit Anhaltspunkte für die Verbesserung der Lokalprognose auf Nebel zu finden.

Dies waren die Hauptgrundsätze für die neue Organisation. Eine große Schwierigkeit bestand nun darin, gegen nicht zu hohe monatliche Entschädigungen doch sorgfältige Beobachter zu gewinnen. Es war klar, daß hierfür solche Herren am geeignetsten sein würden, die ohnehin regelmäßige meteorologische Beobachtungen ausführten, und für die es sich dann nur um eine minimale Mehrarbeit handelte. Die Luft-Fahrzeug-Gesellschaft wandte sich daher an den Direktor des Königlich Preußischen Meteorologischen Instituts, Herrn Geh. Regierungsrat Prof. Dr. Hellmann, und dieser erteilte in liebenswürdigster Weise seinen geübten Beobachtern die Genehmigung, die von der Luft-Fahrzeug-Gesellschaft gewünschten Notierungen zu übernehmen.

Digitized by Google

So entstand denn der Nebelbeobachtungsdienst, der seit dem 1. März 1913 regelmäßig funktioniert. Er umfaßt vorerst außer Bitterfeld die 5 Punkte Eilenburg, Halle a. S., Roßlau, Schkeuditz und Wittenberg. Diese liegen in ca. 30 km Entfernung ziemlich regelmäßig um Bitterfeld verteilt. Bei ihrer Auswahl ist auf möglichst verschiedenartige Lage in mehreren Flußtälern und dazwischenliegenden Landstreifen besondere Rücksicht genommen worden. Für jede dieser Stationen sind dann die Entfernungen einer Reihe von optisch hervorragenden Objekten, wie Kirchen, Schornsteine, Mühlen usw. bestimmt worden, und zwar im allgemeinen zwischen 100 und 3000 m. Als Sichtigkeitsdistanz wird nun stets die Entfernung desjenigen Objektes angegeben, das als weitestes der gewählten noch sichtbar ist. Wenn also beispielsweise eine Kirche in 1800 m Entfernung noch erkannt wird, eine Mühle in 2200 m jedoch nicht mehr, so erfolgt die Eintragung: Nebel 1800. Ob das Auge des Beobachters etwas besser oder schlechter ist, spielt hierbei, wie sich leicht praktisch feststellen ließ, keine nennenswerte Rolle. Gegebenenfalls könnte man bei der Auswahl der Stationen auch hierauf etwas Rücksicht nehmen. In derselben Weise wie beim Nebel wird nun auch angegeben, ob die Sichtigkeit etwa durch Regen oder Schnee u. ä. beeinträchtigt ist. Ebenfalls hat stets eine entsprechende Eintragung zu erfolgen, falls der blaue Himmel oder die Sonne durch den Nebel hindurchscheint, weil dies unter Umständen sehr zur Klärung der Sachlage beiträgt. Die Beobachtungsresultate werden der Luftfahrzeug-Gesellschaft einerseits regelmäßig monatlich zugesandt, andererseits wird im Bedarfsfalle telegraphisch oder telephonisch Auskunft erteilt. Da es weiterhin in verschiedenen Fällen von Wert ist, die Höhe der oberen Nebelgrenze zu finden, so ist die Herstellung eines Instrumentes in Angriff genommen worden, das auf hygrometrischer Grundlage vom Fesselballon oder Drachen aus an den Aufstiegspunkt Meldung erstattet, wenn der Nebel durchbrochen ist. Die Firma P. C. Goerz in Friedenau hat sich zur Ausführung der Konstruktionseinzelheiten bereit erklärt, sodaß der Apparat voraussichtlich in kurzem wird in Tätigkeit treten können.

Aus der noch zu kurzen Zeit des Bestehens des Nebelbeobachtungsdienstes läßt sich nun heute noch nicht mit Gewißheit ersehen, ob sich wesentliche Änderungen als notwendig erweisen, oder ob die Resultate auch auf dieser Grundlage schon den Erwartungen entsprechen werden. Um hierüber Klarheit zu gewinnen, muß insbesondere die nebelreichere, kalte Jahreszeit abgewartet werden. Es ist jedenfalls zu hoffen, daß es auf diesem Wege möglich sein wird, den Nebel, diesen gefährlichen Feind der Luftfahrt, erfolgreich zu bekämpfen.

Digitized by Google

Tabelle 1.

Übersicht über die bis zum Sommer 1913 fertiggestellten und im Bau befindlichen Zeppelin-Luftschiffe.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bezeichnung	Rauminhalt cbm	Länge m	Größter Durchmesser des Tragkörpers m	Motoren	Schrauben	Höchste Eigengeschwindigkeit m/sec	Eigentümer	Bemerkungen
L. Z. 1	11300	128	11,7	2 Daimler zu je 16 PS	4 dreiflügel. Alum.-Schr.	7,5	Graf Zeppelin	1. Fahrt am 2. 7. 00. Abmontiert Frühjahr 1901.
L. Z. 2	11300	128	11,7	2 Daimler zu je 85 PS	4 dreiflügel. Alum.-Schr. mit Stahlarmen	11	do.	1. Fahrt am 30. 11. 05. In der Nacht vom 17. zum 18. 1. 06 bei Kisslegg von der Verankerung losgerissen und zerstört.
L. Z. 3	11300	128	11,7	do.	do.	11	Preuß. Heeresverwaltung Z. I.	1. Fahrt 9. 10. 06.
Umbau 3	12200	136	11,7	2 Daimler zu je 105 PS	do.	15	do.	1. Fahrt am 23. 10. 08. 1911 nach den neuesten Erfahrungen abermals umgebaut. Standort: Metz. Abmontiert.
L. Z. 4	15000	136	13	do.	do.	12,5	L. Z.	1. Fahrt 20. 6. 08. Am 5. 8. bei Echterdingen zerstört.
L. Z. 5	15000	136	13	do.	do.	12,5	Preuß. Heeresverwaltung Z. II.	1. Fahrt 26. 5. 09. Durch Sturm bei Weilburg zerstört. 25. 4. 1910.
L. Z. 6	15000	136	13	2 Daimler zu je 115 PS	do.	13	L. Z.	1. Fahrt 25. 8. 09.
Umbau 6	16000	144	13	2 Daimler zu je 115 PS 1 Maybach zu 140 PS	2 zweiflügel., 2 vierflügel. Alum.-Schr. mit Stahlarmen	15,5	L. Z.	1. Fahrt Mai 1910. Verbrannt 14. 9. 10 in der Halle in Oos.
L. Z. 7 „Deutschland“	19300	148	14	3 Daimler zu je 125 PS	do.	16	Delag	1. Fahrt 19. 6. 10. Gestrandet im Teutoburger Wald. 28. 6. 10.
L.Z.8 „Ersatz Deutschland“	19300	148	14	do.	do.	16,1	Delag	1. Fahrt 30. 3. 11. Am 16. 5. 11 beim Ausfahren aus der Halle in Düsseldorf zerstört.
L. Z. 9	17800	148	14	3 Maybach zu je 150 PS	do.	21	Preuß. Heeresverwaltung Z. II	1. Fahrt 2. 10. 11.
L. Z. 10 „Schwaben“	17800	140	14	3 Maybach zu je 150 PS	2 zweiflügel., 2 vierflügel. Alum.-Schr. mit Stahlarmen	19,3	Delag	1. Fahrt 26. 6. 11. Am 28. 6. 12 vor der Halle in Düsseldorf verbrannt.

Digitized by Google

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bezeichnung	Rauminhalt cbm	Länge m	Größter Durchmesser des Tragkörper m	Motoren	Schrauben	Höchste Eigengeschwindigkeit m/sec	Eigentümer	Bemerkungen
L. Z. 11 „Victoria Luise“	18700	148	14	3 Maybach zu je 150 PS	do.	21,1	Delag	1. Fahrt 14. 2. 1912. Standort: Frankfurt a. M.
L. Z. 12	17500	140	14	do.	do.	21,7	Preuß. Heeresverwaltung Z. III	1. Fahrt 25. 4. 1912.
L. Z. 13 „Hansa“	18700	148	14	3 Maybach zu je 170 PS	do.	22,2	Delag	1. Fahrt 30. 7. 1912.
L. Z. 14	22465	157,8	14,8	3 Maybach zu je 170 PS	2 zweiflügel., 2 vierflügel. Alum.-Schr. mit Stahlarmen	21,2	Kaiserl. Marine L. I	1. Fahrt 7. 10. 1912. Am 9. 9. 1913 bei Helgoland durch Sturm zerstört und untergegangen.
L. Z. 15	19500	141	14,81	do.	do.	21,4	Preuß. Heeresverwaltung Ersatz Z. I	1. Fahrt 16. 1. 13. Am 19. 3. 13 bei Karlsruhe zerstört.
L. Z. 16	19500	141	14,81	do.	do.	21,4	Preuß. Heeresverwaltung Z. IV	1. Fahrt 14. 3. 1913.
L. Z. 17 „Sachsen“	ca. 19570	139	14,8	do.	do.	20,5	Delag	1. Fahrt 3. 5. 1913.
L. Z. 18	26000	160	16,5	4 Maybach zu je 200 PS	4 vierfl.	ca. 22	Kaiserl. Marine L. II	1. Fahrt 20. 9. 13. Am 17. 10. 13. bei Johannisthal in der Luft explodiert und verbrannt.
L. Z. 19	19570	139	14,8	3 Maybach zu je 180 PS	do.	21,2	Preuß.- Heeresverwaltung Ersatz Z. I	1. Fahrt 7. 6. 13.
L. Z. 20	19570	139	14,8	do.	do.	21,2	Preuß. Heeresverwaltung Z. V	1. Fahrt 8. 7. 13.

Digitized by Google

Tabelle 2.

Übersicht über die bis zum Sommer 1912 fertiggestellten und im Bau befindlichen Parseval-Luftschiffe.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bezeichnung	Rauminhalt cbm	Länge m	Größter Durchmesser des Tragkörpers m	Motoren	Schrauben	Höchste Eigengeschwindigkeit m/sec	Eigentümer	Bemerkungen
Versuchs-Luftschiff	2300 später 2800	50	8,9	1 Daimler zu 85 PS	1 vierflügel. unstarre Stoffschraube	12	Die Gondel ist im Besitz des Deutschen Museums in München	1. Fahrt 26. 5. 06.
P. L. 1	3200	60	9,4	do.	do.	12	Kaiserl. Aero-Klub	Durch Umbau aus dem Versuchsluftschiff entstanden. Standort: Bitterfeld.
P. L. 2	4000	60	10,4	do.	do.	12,5	Preuß. Heeresverwaltung P. I	1. Fahrt 13. 8. 08. Abmontiert.
P. L. 3	6600	70	12,3	2 N. A. G. zu je 110 PS	2 vierflügel. unstarre Stoffschraub.	14,2	Preuß. Heeresverwaltung P. II	1. Fahrt 18. 2. 09. Am 16. 5. 11 infolge Havarie außer Dienst gestellt.
P. L. 4	2300	50	8,6	1 österreich. Daimler zu 70 PS	1 dreiflügel. halbstarre Stoffschraube	12,5	Österreichische Heeresverwaltung	In Österreich erbaut.
P. L. 5	1450	40	8	1 Daimler zu 25 PS	do.	9	Luftverkehrs-G. m. b. H.	1. Fahrt 8. 12. 09. Am 16. 6. 11 in Münden verbrannt.
P. L. 6	6800 später 8000	70	12,3 später 15	2 N. A. G. zu je 110 PS	2 vierflügel. halbstarre Stoff-schrauben	15 später 14	Luftfahrzeug-G. m. b. H.	1. Fahrt 30. 6. 10.
P. L. 7	7600	72	14	do.	do.	16,3	Russische Heeresverwaltung	1. Fahrt 30. 10. 10. In Bitterfeld gebaut. Abnahmefahrten in Salisi bei Gatschina in Rußland erledigt.
P. L. 8	8000	77	14	2 Maybach zu je 180 PS	2 vierflügel. halbstarre Stahlblech-schrauben	—	Als Ersatz für P. II im Auftrag der Preußischen Heeresverwaltung erbaut	7.—12. 2. 13 Abnahmefahrten.
P. L. 9	1700 ab Spätsommer 1912: 2200	40 später 50	8	1 N. A. G. zu 50 PS	1 zweiflügel. Holzschraube	11	Türk. Heeresverwaltung	1. Fahrt 10. 10. 10. April 1913 an die Türkei verkauft.
P.L. 10	1700	45	8	1 N. A. G. zu 50 PS	1 zweiflügel. Holzschraube	—	Luftfahrzeug-G. m. b. H.	Liegt unmontiert in Bitterfeld.
P.L. 11	10000	84	15,5	2 Körting zu je 200 PS	2 vierflügel. halbstarre Stahlblech-schrauben	18	Preuß. Heeresverwaltung P. III	
P.L. 12 „Charlotte“	8000	82	14	2 N. A. G. zu je 110 PS	do.	16	Rheinisch-Westfälische Flug- und Sportplatz-G. m. b. H.	Passagier- und Lichtreklame-Luftschiff.

Digitized by Google

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bezeichnung	Raum-inhalt cbm	Länge m	Größter Durchmesser des Tragkörpers m	Motoren	Schrauben	Höchste Eigengeschwindigkeit m/sec	Eigentümer	Bemerkungen
P.L. 13	8000	79	14,5	2 Maybach zu je 150 PS	2 vierflügel. halbst. Stahlblechschraub.	18,4	Japanische Heeresverwaltung	1. Fahrt 3. 4. 12.
P.L. 14	9600	90	15,5	2 Maybach zu je 176 bis 190 PS	do.	18,6	Russische Heeresverwaltung	1. Fahrt 27. 2. 13.
P.L. 15	10000	96	15,5	3 Maybach zu je 180 PS	—	—	Wird für das Ausland erbaut	—
P.L. 16	9600	84	15	2 Maybach zu je 180 PS	2 vierflügel. Holzschrauben	19,5	Wird für die Preuß. Heeresverwaltung erbaut	1. Fahrt 2. 10. 13.
P.L. 17	9600	85	15,5	2 Maybach zu je 170 PS	2 vierflügel., halbstarre Stahlblechschrauben	19	Italien. Heeresverwaltung	1. Fahrt 30. 9. 12.
P.L. 18	8500	80	15	2 Maybach zu je 176 bis 190 PS	do.	ca. 19	Englische Marine	1. Fahrt am 3. 5. 13.

Digitized by Google

Tabelle 3.

Übersicht über die übrigen, fertiggestellten, deutschen Luftschiffe.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bezeichnung	Raum-inhalt cbm	Länge m	Größter Durchmesser des Tragkörpers m	Motoren	Schrauben	Höchste Eigengeschwindigkeit m/sec	Eigentümer	Bemerkungen
Schütte-Lanz I	20000	130	18,4	2 Daimler zu je 250 PS	2 dreiflügel. Stahlblechschrauben	18	Firma Heinrich Lanz	Am 17. Juli 1913 bei Schneidemühl von der Verankerung losgerissen und zerstört.
Siemens-Schuckert I	15000	120	13,5	4 Daimler zu je 120 PS	4 zweiflügel. und 2 vierflügel. Stahlschrauben	19,8	Preuß. Heeresverwaltung	Ist abmontiert.
Suchard	10000	75	17	2 N. A. G. zu je 110 PS	2 vierflügel. unstarre Stoffschrauben	10	Transatlantische Flug-Expedition	Ist abmontiert.
Clouth	1850	42	8,5	1 Adler zu 50 PS	2 zweiflügel. Holzschrauben	8,5	Luftfahrzeug-G. m. b. H.	Ist abmontiert.
Ruthenberg I	1200	40	6,5	1 Motor zu 24 PS	1 vierflügel. Stahlblechschraube in einem Rahmen	10	Herr Haase, Hamburg	
Ruthenberg II	1700	46	7,4	1 Motor zu 75 PS	do.	10	Ing. H. Ruthenberg, Weißensee bei Berlin	

Digitized by Google

Tabelle 4.

Übersicht über die in Betrieb befindlichen Luftschiffe anderer Länder.

Die Angaben in dieser Tabelle sind zum großen Teil aus dem Werke: „Die internationalen Luftschiffe und Flugdrachen“ von Oberleutnant Paul Neumann, Luftfahrerschule Berlin-Adlershof, Verlag von Gerhard Stalling, Oldenburg, entnommen.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bezeichnung und Bauart	Raum-inhalt cbm	Länge m	Größter Durchmesser des Tragkörpers m	Motoren	Schrauben	Höchste Eigen-geschwindig-keit m/sec	Eigentümer	Bemerkungen
Belgien.								
Belgique III halbstarr Langgondel	4100	65	11	2 Germain zu je 100 PS	3 zweiflügelige Holzschrauben	14,5	Belgische Heeresverwaltung	
Ville de Bruxelles halbstarr Langgondel	8300	75	14	2 Pipe zu je 110 PS	do.	14		
England.								
Beta halbstarr Langgondel	2000	46	8	2 Green zu je 50 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	12	Heeresverwaltung	
Delta do.	3400	—	—			14	do.	Hülle aus Goldschlägerhaut.
Astra Torrès 3 unstarr	18 000	120	16	4 Panhard zu je 250 PS	8 zweiflügelige Holzschrauben	—	Marine	Verunglückte Probefahrt am 12. Juni 1913.
Parseval (P. L. 18.) do.	8500	80	15	2 Maybach zu je 176—190 PS	2 vierfl. halbst. Stahlschraub.	ca. 19	Marine	Letzte Abnahmefahrt am 30. Juni in England erledigt.
Rußland.								
Lebedj halbstarr Kielgerüst	3700	61	11	1 Panhard zu 70 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	13	Heeresverwaltung	
Clement-Bayard I halbstarr Langgondel	3500	56	10,5	1 Clément-Bayard zu 110 PS	1 do.	12,5	do.	
Zodiac VIII halbstarr Langgondel	2140	47	9	1 Dansette-Gillet zu 60 PS.	1 do.	13	do.	
Parseval (P. L. 7) unstarr	7600	72	14	2 N. A. G. zu je 110 PS	2 vierfl. halbst. Stoffschrauben	16,3	do.	
Jastréb halbstarr Langgondel	2800	50	9	1 E. N. V. zu 75 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	—	do.	
Golob halbstarr Langgondel	2270	50	8	1 E. N. V. zu 75 PS	do.	—	do.	
Kobtchik halbstarr Langgondel	2150	45	8	2 Motoren zu je 45 PS	do.	—	do.	
Sokol halbstarr Langgondel	2500	50	9	1 Dion Bouton zu 80 PS	do.	14	do.	
Kretchet halbstarr Kielgerüst	6900	70	11	2 Panhard zu je 100 PS	do.	—	do.	
Parseval (P. L. 14) unstarr	9600	90	15,5	2 Maybach zu je 176-190PS	2 vierfl. halbst. Stahlblech-schrauben	18,6	do.	Abnahmefahrten vom 27. 2. bis 1. 3. 13.
Kowanko	13 000	80	—	4 Motoren zu je 80 PS	4 zweiflügelige Holzschraube	—	do.	

Digitized by Google

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bezeichnung und Bauart	Raum-inhalt cbm	Länge m	Größter Durchmesser des Tragkörpers m	Motoren	Schrauben	Höchste Eigen-geschwindig-keit m/sec.	Eigentümer	Bemerkungen
Österreich-Ungarn.								
M I (Parseval 4) unstarr	2300	50	8,6	1 österr. Daimler zu 70 PS	1 dreiflügelige halbstarre Stottschrauben	12,5	Heeresver-waltung	
M II halbstarr Kielgerüst	4800	70	11	do. zu 130 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	12,5	do.	Abmontiert.
M III halbstarr Gondelversteifung	3600	68	10,5	2 Körting zu je 75 PS	do.	13,8	do.	Wird umgebaut.
Stagel-Mansharth (Austria) halbstarr Langgondel	8200	92	13	2 österr. Daimler zu je 130 PS	2 vierflügelige Holzschrauben	17	Österr. Luft-Verkehrs-Ge-sellschaft	Dient zu photo-grammetrischen Aufnahmen.
Bömsches, unstarr	2900	57	9	2 Körting zu je 36 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	12	Heeresver-waltung	Abmontiert.
Italien.								
Erbaut von den Werkstätten der Brigata Specialisti in Rom nach den Erfahrunngen von Forlanini, Crocco, Ricaldoni und de Fabbro.								
P I (Picollo-klein) halb-starr, gelenkiges Stahl-rohrgerippe innerhalb der Hülle	4200	60	11,60	1 Clément-Bayard zu 100 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	14,5	Heeresver-waltung	
P. II do.	4400	63	11,60	1 do. zu 120 PS	do.	15,5	do.	
P. III do.	4400	63	11,60	1 do.	do.	15,5	do.	
P. IV do.	4700	63	12	2 Fiat à 80 PS	do.	—	do.	
P. V. do.	4700	63	12	do.	do.	—	do.	
M. I (Medio = mittel) do.	12100	83	17	2 Fiat à 250 PS	2 vierflügelige Holzschrauben	19,5	Marine-ministerium	
M. II do.	12100	83	17	4 Woolseley à 125 PS	do.		Heeresver-waltung	
Erbaut von den Werkstätten der Luft-Fahrzeug-G. m. b. H. in Bitterfeld.								
Parseval P. L. 17 unstarr	9600	85	15,5	2 Maybach à 170 PS	2 vierfl. halbst. Stahlblech-	ca. 19	Heeresver-waltung	
Erbaut in Baggio bei Mailand nach den Plänen von Forlanini.								
Città di Milano halbstarr	12000	72	18	2 Motoren zu je 80 PS		—	Heeresver-waltung	
Ausonia II halbstarr Langgondel	1500	37	8,25	1 Faccioli zu 55 PS	1 zweiflügelige Holzschraube	11	Nico Piccoli	
Usuelli Borsalino do.	3870	51	9,80	1 do. zu 80 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	12	Usuelli	
Frankreich.								
Bauart der Fa. Astra, Société de constructions aéronautiques. Anciens établissements Surcouf, Billancourt (Seine).								
Lieutenant Chauré halbstarr Langgondel	8800	84	14	2 Chenu à 190 PS	3 zweiflügelige Holzschranben	15,5	Heeresver-waltung	
Croiseur transaérienne	9000	76	14,3	do.	do.	16	do.	
Bauart Ingenieur Spieß. Starrschiff erbaut von der Zodiac Société Française de ballon dirigeable in Puteaux.								
Spieß 1, starr	12800	116	13	2 Chenu à 180 PS	4 zweiflügelige Holzschrauben	17(?)	do.	
Bauart Établissement de'Aéronautique militaire.								
Fleurus, unstarr	6500	77	12	2 Clément-Bayard à 80 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	16	do.	

Digitized by Google

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bezeichnung und Bauart	Raum-inhalt cbm	Länge m	Größter Durchmesser des Traggörpers	Motoren	Schrauben	Höchste Eigen-geschwindig-keit m. p. s	Eigentümer	Bemerkungen
Bauart der Usines Clément-Bayard in Levallois-Perret (Seine).								
Dupuy de Lôme, halbstarr, Langgondel	9000	88	13,5	2 Clément-Bayard à 190 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	14	Heeresver-waltung	
Adjutant Vincenot, do.	9600	98	14	2 do. à 120 PS	do.	14,5	do.	
Clément-Bayard V do.	9000	89	13	2 do. à 125 PS	do.	15,5	do.	
Clément-Bayard VI do.	6900	76	13,5	2 do. à 80 PS	do.	12,5	do.	
Bauart Ateliers Lebaudy frères in Moisson (Seine et Oise).								
Lt. Selle de Beauchamps, halbstarr, Kielgerüst	10000	89	14,6	2 Panhard à 80 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	12,5	Heeresver-waltung	
Bauart Zodiac Société Française de ballon dirigeable in Puteaux, Konstruktion Mallet.								
Le Temps halbstarr, Langgondel	2400	76	11,36	1 Dansette-Gillet zu 60 PS	2 zweiflügelige Holzschrauben	13,5	Heeresver-waltung	
Capitaine Ferber do.	5000	75	12	2 Panhard à 75 PS	do.	15,5	do.	
Commandant Coutelle do.	9000	88	12,5	2 Panhard à 190 PS	4 do.	—	do.	

Digitized by Google

Geschäftliches.

Digitized by Google

Digitized by Google

1. Aufsichtsrat.

1. Gradenwitz, R., Fabrikbesitzer, Vorsitzender,
2. Oliven, O., Generaldirektor, stellv. Vorsitzender,
3. Clouth, M., Fabrikbesitzer,
4. Netter, C. L., Kommerzienrat,
5. von Parseval, A., Major z. D., Professor Dr.-Ing. h. c.,
6. Rathenau, E., Dr., Geh. Baurat,
7. Rathenau, W., Dr.,
8. Schwabach, P., Dr., Generalkonsul,
9. Simon, J., Dr.

Das Jahrbuch 1912/13 schließt seinen Bericht mit dem 30. Juli 1913 ab. Von diesem Zeitpunkt ist über die Tätigkeit der Luft-Fahrzeug-Gesellschaft folgendes zu berichten:

2. Personalveränderungen.

Für den am 21. Januar 1910 verstorbenen Staatssekretär a. D. Exz. von Hollmann wurde der Fabrikbesitzer Herr R. Gradenwitz zum Vorsitzenden des Aufsichtsrats der Luft-Fahrzeug-Gesellschaft m. b. H. gewählt. An Stelle des satzungsgemäß ausgeschiedenen stellv. Vorsitzenden des Aufsichtsrats, Herrn Geh. Baurat Dr. E. Rathenau, wurde Herr Generaldirektor O. Oliven zum stellv. Vorsitzenden gewählt.

Am 31. Januar 1913 schied der zweite Geschäftsführer, Herr Kapitänleutnant a. D. Hermann Ed. von Simson, aus den Diensten der Gesellschaft aus und trat zur Direktion der Friedrich-Krupp-A.-G. über. Am selben Tage wurde Herrn Oberleutnant a. D. Stelling, der am 1. Mai 1912 wieder zur Luft-Fahrzeug-Gesellschaft m. b. H. übergetreten war, und Herrn Oberingenieur Kiefer, für diese Gesellschaft Prokura erteilt.

In der Zusammensetzung des Ingenieur- und technischen Personals in Bitterfeld sind wesentliche Änderungen nicht eingetreten. Herr Dr. Herrmann Rotzoll hat nach vollendeter Ausbildung durch die Luftschiffkommission des Deutschen Luftfahrer-Verbandes sein Patent als Luftschiffführer erhalten.

3. Todesfälle.

Die Gesellschaft hat im verflossenen Berichtsjahre durch den Tod von zwei Mitgliedern ihres Aufsichtsrates schwere Verluste erlitten.

Am 21. Januar 1913 starb der frühere Staatssekretär des Reichsmarineamts, Admiral à la suite des Seeoffizierkorps Friedrich von Hollmann im 71. Lebens-

Digitized by Google

jahre. Seit der Begründung der M. St. G. hat der Verstorbene als Vorsitzender des Aufsichtsrats und des technischen Ausschusses der Gesellschaft angehört. Mit ihm ist ein einflußreicher und eifriger Förderer der Motorluftschiff-Studiengesellschaft dahingegangen, dessen Andenken die Gesellschaft in aufrichtiger Verehrung und Dankbarkeit fortleben lassen wird.

Am 12. März 1913 starb der Bankier Herr Ludwig Delbrück, Mitglied des Herrenhauses. Der Dahingegangene gehörte zu den Gründern der M. St. G. und der L. F. G. und hat deren Aufsichtsräten vom Bestehen ab angehört. Wir haben mit ihm einen tatkräftigen und opferwilligen Förderer unserer Bestrebungen verloren und werden stets mit Dankbarkeit und aufrichtiger Verehrung seiner gedenken.

4. Betrieb.

a) Luftschiffe.

In unserem Jahrbuch 1911/12 sind am Schluß dieses Kapitels zwei für das Ausland bestimmte, im Bau befindliche Luftschiffe erwähnt. Diese zwei Luftschiffe, der P. L. 17 und P. L. 14, sind in diesem Berichtszeitraum fertiggestellt und abgeliefert worden.

Der P. L. 17, der annähernd ein Schwesterschiff des P. L. 13, nur mit etwas größerem Rauminhalt, darstellt, konnte, da eine Neukonstruktion nicht nötig war, in verhältnismäßig kurzer Zeit fertiggestellt werden. Die erste Werkstattfahrt unternahm das Schiff am 30. September 1912. Im Laufe des Monats Oktober erledigte der P. L. 17 seine sämtlichen Abnahmefahrten und wurde, da er den Anforderungen vollständig genügte, von der Abnahmekommission übernommen und ins Ausland überführt, wo er im Frühjahr 1913 in Betrieb genommen wurde.

Der P. L. 14 konnte seine Abnahmefahrten innerhalb 3 Tagen, in der Zeit vom 27. Februar bis 1. März, erledigen. Unmittelbar an die ersten Werkstattfahrten schlossen sich die verschiedenen Prüfungen an, die trotz des an diesen Tagen herrschenden recht lebhaften und sehr böigen Windes glatt verliefen. Nachdem das Schiff noch einige Ausbildungsfahrten für das zukünftige Personal geleistet hatte, wurde es im Monat März abgenommen und in das Ausland überführt.

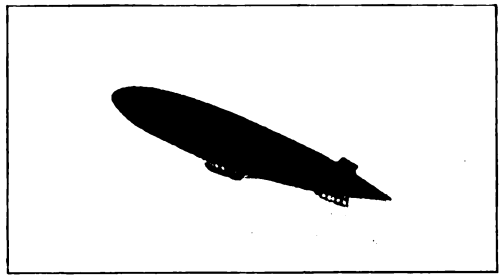
Der P. L. 8 (P. II) der preußischen Heeresverwaltung bestand seine Abnahmeprüfungen in den ersten Tagen des Februar, nachdem er, wie bereits im vorigen Jahrbuch erwähnt, mit neuen, stärkeren Motoren ausgerüstet war.

Bei der Höhen- und Dauerfahrt am 7. Februar, die von Bitterfeld über Halle nach dem Harz und von dort über Staßfurt nach Bitterfeld zurückführte, hatte das Luftschiff über dem Harzgebirge gegen sehr heftigen Wind von 18 m/sec anzukämpfen. Bei der Überführung von Bitterfeld nach Cöln wurde die Strecke Gotha—Cöln in der Zeit von 3½ Stunden mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 80 km pro Stunde zurückgelegt. Der P. L. 8 befindet sich jetzt im Besitz der preußischen Heeresverwaltung und ist in Cöln stationiert.

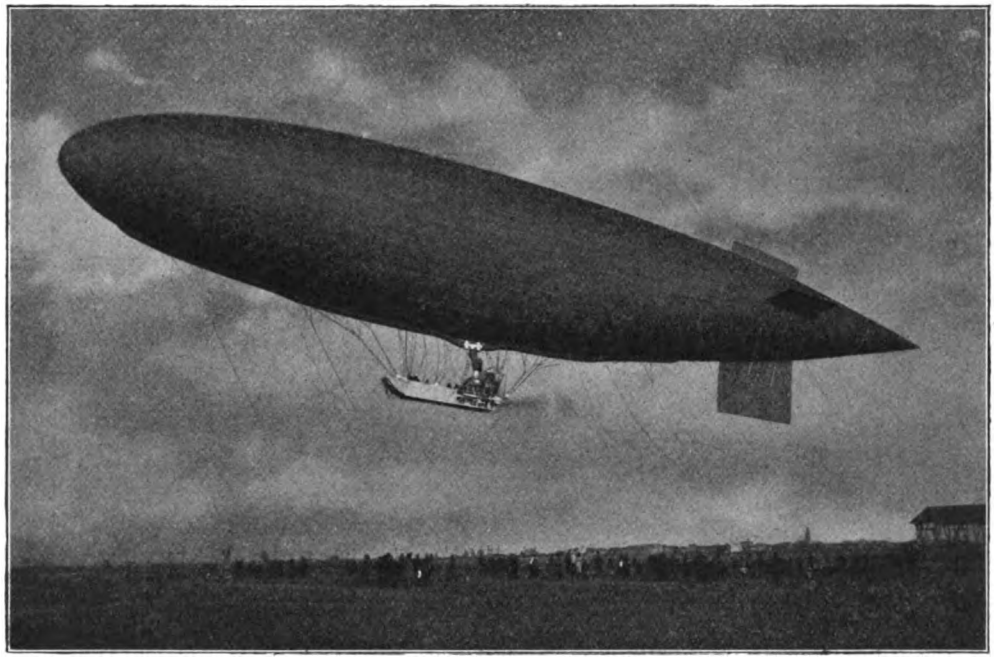
Ein weiteres Luftschiff für das Ausland, der P. L. 18, wurde, nachdem er in Bitterfeld seine ersten Probefahrten zur Zufriedenheit der anwesenden Abnahmekommission erledigt hatte, Anfang Mai dieses Jahres in das Ausland überführt.

Digitized by Google

Nachdem das Luftschiff dort am 30. Juni noch eine mehrstündige Dauerfahrt glatt erledigt hatte, wurde es an letzterem Tage abgenommen.



P. L. 18 in voller Fahrt.

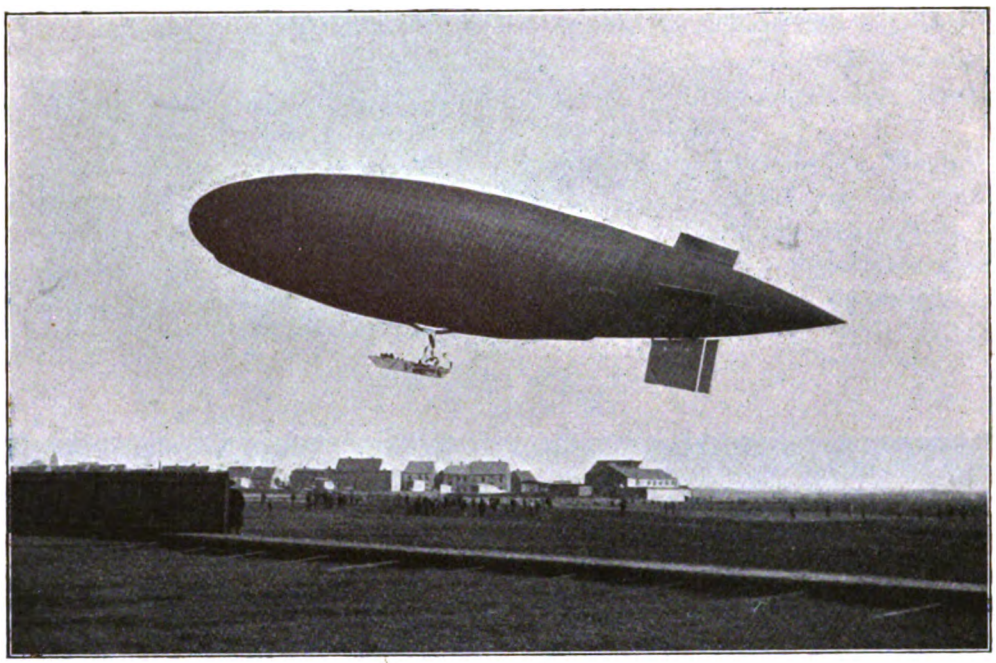


P. L. 18.

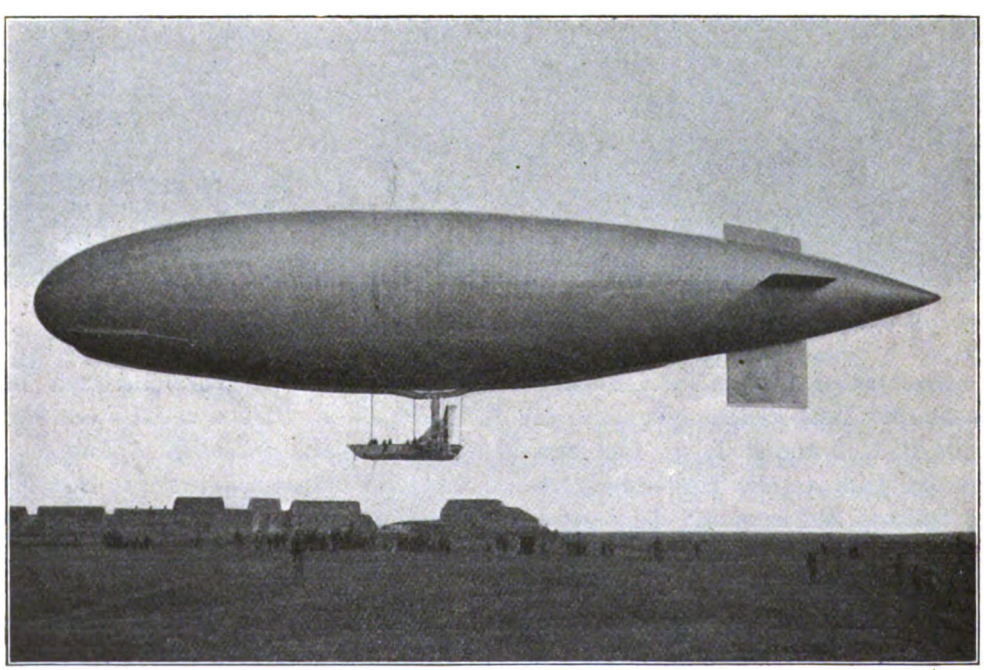
Von der Luftfahrt-Betriebs-Gesellschaft, die ihren Betrieb eingestellt hat, erwarb die Luft-Fahrzeug-Gesellschaft im März dieses Jahres die beiden Luftschiffe P. L. 6 und P. L. 9. Das letztere wurde im April, nebst einem kompletten Luftschiffpark, an die Türkei verkauft, nachdem die Abnahmefahrten in Bitterfeld zur vollsten Zufriedenheit der türkischen Regierungskommission verlaufen waren. Die gestellten Abnahmebedingungen wurden von dem kleinen, nur 2200 cbm fassenden Luftschiff wesentlich übertroffen.

Der P. L. 6 verbleibt vorläufig im Besitz der L. F. G. und wird zur praktischen Erprobung konstruktiver Neuerungen und zur Ausbildung von Luftschiffführern und Fahrpersonal benutzt werden.

Digitized by Google

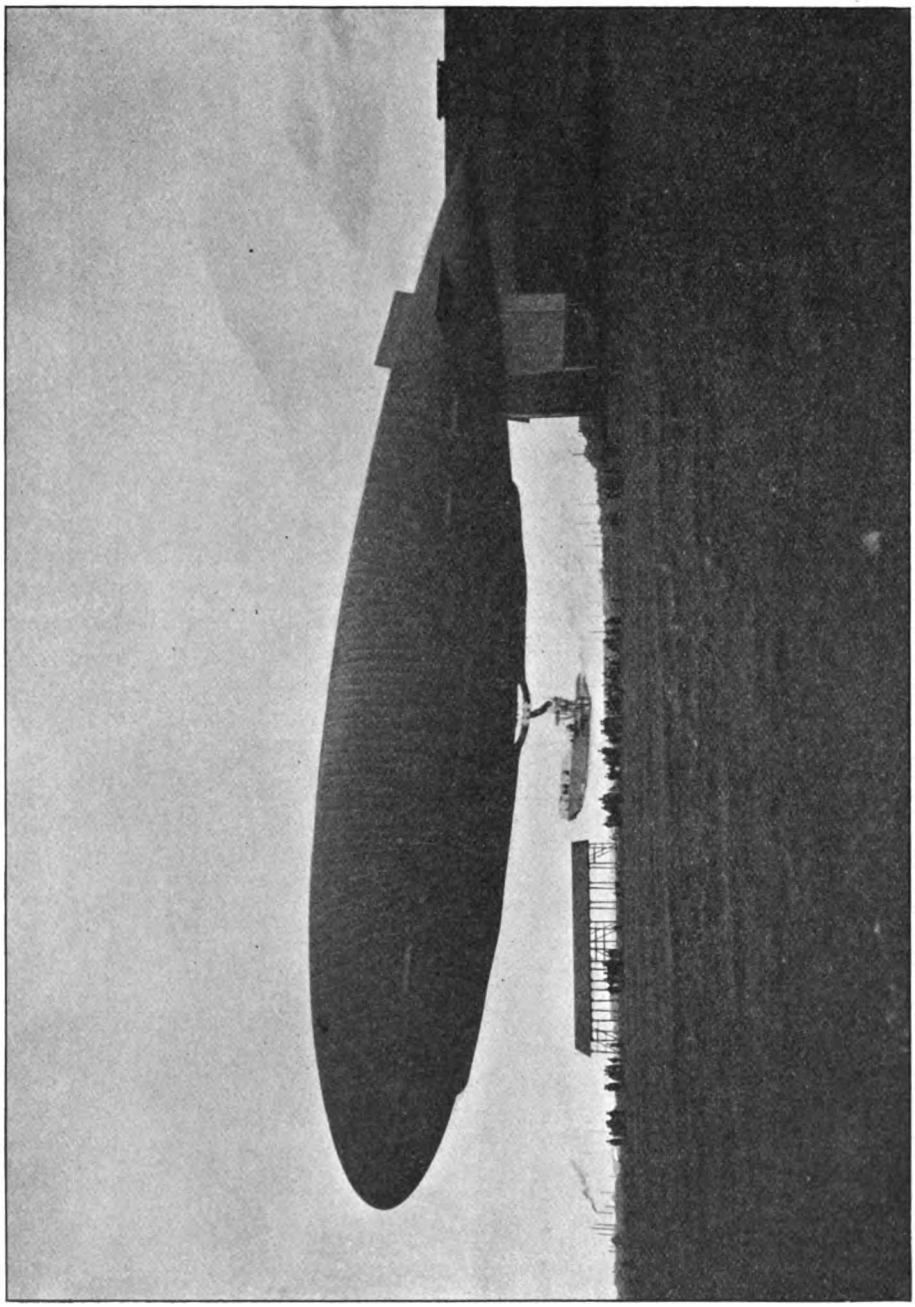


P. L. 14.



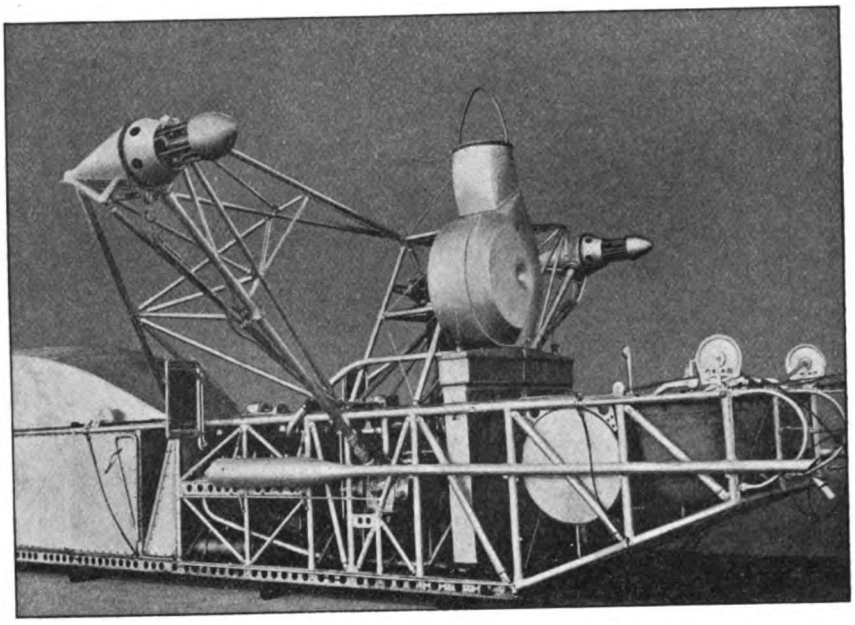
P. L. 17.

Digitized by Google

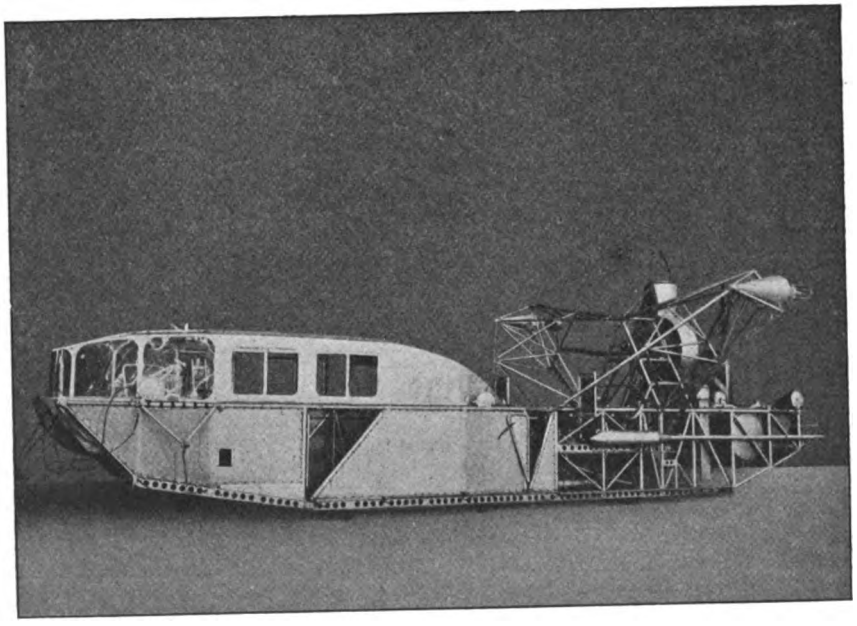


P. L. 16. (P. IV.)

Digitized by Google



Getriebe des P. L. 16.



Gondel des P. L. 16.

Digitized by Google

Die Inangriffnahme des Baues des P. L. 16 für die preußische Heeresverwaltung hatte sich bis zum April dieses Jahres verzögert, weil die Militärbehörde einige Änderungen an dem Vertrage vorzunehmen wünschte, so daß die Vertragsbestätigung erst im Laufe des Monats April erfolgte. Die Fertigstellung und Abnahme des im Bau befindlichen Luftschiffes ist noch im Laufe des Sommers zu erwarten. Es befindet sich ferner im Bau eine Dreimotorengondel für eine auswärtige Macht. Außerdem schweben zurzeit Verhandlungen mit verschiedenen europäischen und außereuropäischen Staaten, die voraussichtlich zur Erteilung weiterer Aufträge führen werden.

b) Flugzeuge.

Dem Beispiel der meisten Luftschiffwerften des Inn- und Auslandes folgend, hat auch die Luft-Fahrzeug-Gesellschaft in diesem Jahr den Flugzeugbau aufgenommen. Es wurden mehrere moderne Doppel- und Eindecker gebaut, deren Inbetriebnahme auf dem Flugplatz in Johannisthal im Laufe des Sommers erfolgte.

Nach Überwindung verschiedener Anfangsschwierigkeiten gelang es, mit dem Eindecker, einem fast ausschließlich aus Stahl bestehenden Taubentyp, die militärischen Prüfungsbedingungen in guter Weise zu erfüllen, sodaß die Heeresverwaltung einen Apparat in Auftrag gab und für den Fall zufriedenstellender Lieferung weitere Bestellungen zusagte.

Sowohl die „Taube" als auch der „Pfeildoppeldecker" nahmen an dem Wettbewerb „Rund um Berlin" teil und erwiesen sich bei dieser Gelegenheit im Vergleich zu den konkurrierenden Apparaten anderer Systeme als recht leistungsfähig: Der Pfeil konnte unter 30 Bewerbern den sechsten Platz belegen, während die Taube infolge ihrer hohen Eigengeschwindigkeit wahrscheinlich unter den Siegern gewesen wäre, wenn sie sich nicht durch anhaltende Motorstörungen am ersten Flugtage aller Chancen begeben hätte.

Wir lassen im folgenden eine kurze Beschreibung beider Flugzeugtypen folgen:

Die „Taube" sowohl als auch der „Pfeildoppeldecker" sind mit Ausnahme der hölzernen Flugzeugrippen vollständig aus profiliertem Stahlrohr hergestellt. Stahl wurde an Stelle des sonst meist üblichen Holzes als Konstruktionsmaterial insbesondere deshalb gewählt, weil seine Verwendung die statisch beste Lösung ergab: Größte Widerstandsfähigkeit bei geringstem Gewicht. Abgesehen davon war auch auf die mit hölzernen Flugzeugen in den letzten Kriegen gesammelten Erfahrungen Rücksicht genommen worden, welche gezeigt hatten, daß Holzkonstruktionen durch Witterungseinflüsse sehr bald unbrauchbar werden.

Die in der Flugrichtung pfeilförmige Flügelstellung des Doppeldeckers war gewählt, weil sie dem Flugzeug eine hervorragende Längs- und Querstabilität sichert, die den Führer nahezu vollständig in seiner Tätigkeit entlastet.

Diese durch Erfahrung gewonnene Tatsache führte dazu, auch den Flügeln der Taube eine geringe Pfeilstellung zu geben: Die Praxis liefert den Beweis für die Richtigkeit dieser Anordnung, denn die Luftfahrzeugtaube besitzt in keiner Weise die Neigung, sich auf den Kopf zu stellen, die für die übliche Taubenkonstruktion bekanntlich charakteristisch geworden ist.

Digitized by Google

Da die beiden Flugzeugarten für Heereszwecke bestimmt waren, so wurde vornehmlich Wert auf die Erfüllung der militärischen Anforderungen gelegt: Geräumige Anordnung der Sitze, Handlichkeit der Steuerungen, übersichtliche Anbringung der Instrumente und Apparate, guter Ausblick auf das Gelände.

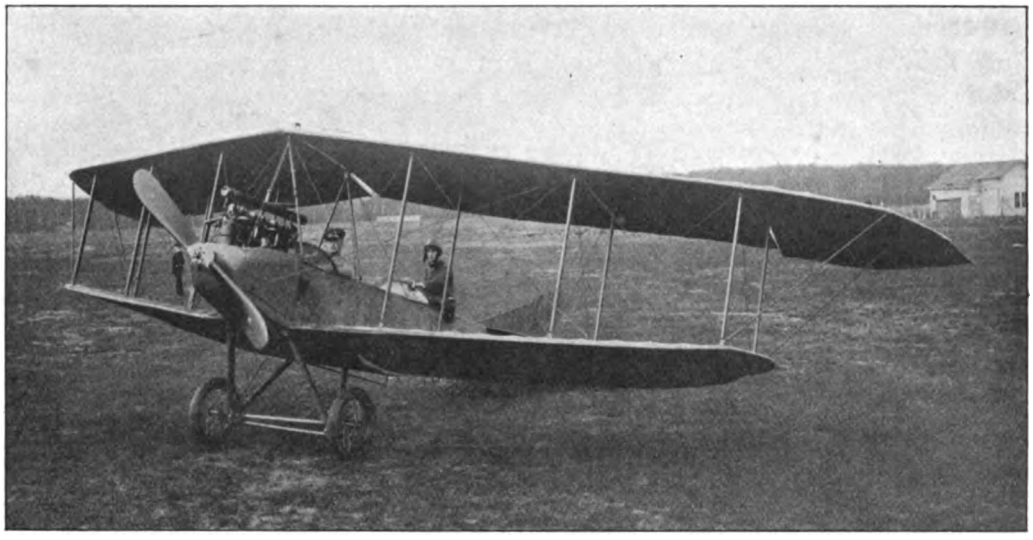


Fig. 1.

Fig. 2.

Die Bauart der Taube insbesondere beseitigt alle die Schwierigkeiten, die den bisher bekannten Konstruktionen infolge der unzulänglichen Beobachtungsmöglichkeit anhafteten.

Schließlich sei noch die überaus robuste Ausführung des Fahrgestells erwähnt.

Digitized by Google

Zum Antrieb beider Flugzeuggattungen dienen 100pferdige — meist sechszylindrige — wassergekühlte Motoren der bekannten Spezialfabriken Mercedes und Argus.

Ein- und Doppeldecker unterscheiden sich entsprechend ihrer verschiedenartigen Anwendungsweise in ihren Leistungen: Übertrifft die Taube den Pfeildoppeldecker an Flug- und Steiggeschwindigkeit, so besitzt dieser wieder eine größere Tragkraft und geringere An- und Auslaufstrecke.

Die nebenstehend abgebildeten Typen haben folgende Abmessungen:

Pfeildoppeldecker:

Spannweite	12,8 m
Größte Länge	8,0 m
Tragfläche	36 × 42 qm
Motor	100 PS.
Gewicht, leer	650 kg
Stundengeschwindigkeit	90—100 km
Steigfähigkeit	800 m in 15 Minuten mit 200 kg Belastung einschließlich Insassen und 120 Liter Benzin.

Taubeeindecker:

Spannweite	16,6 m
Größte Länge	8,0 m
Tragfläche	30 qm
Motor	100 PS.
Gewicht, leer	610 kg
Stundengeschwindigkeit	100 km
Steigfähigkeit	900 m in 8—12 Minuten mit 200 kg Belastung einschl. Insassen und 140 Liter Benzin.

Um Verwechslungen unserer Flugzeuge mit den Erzeugnissen anderer — besonders in der Abkürzung ähnlich lautender — Firmen vorzubeugen, haben wir als Bezeichnung das Kennwort „Roland“ eingeführt.

---

5. Die erzielten Fortschritte im Bau von Prall-Luftschiffen.

a) Die Hüllen der neueren Parseval-Luftschiffe.

Von

Dipl.-Ing. **Naatz**-Bitterfeld.

Im Hüllenbau sind in den letzten Jahren folgende Fortschritte gemacht worden:

1. Die Form der Hüllen ist den letzten Ergebnissen von Modellversuchen entsprechend, also an den Enden spitzer, gewählt worden. Damit reduzierte man den Luftwiderstand auf ein Minimum und kam der typischen Parseval-Takelung

Digitized by Google

besser zu Recht. Zwar mußte man größere Schiffslängen mit in Kauf nehmen, die den Nachteil haben, daß bei Schräglagen in den Spitzen hohe Drücke auf-

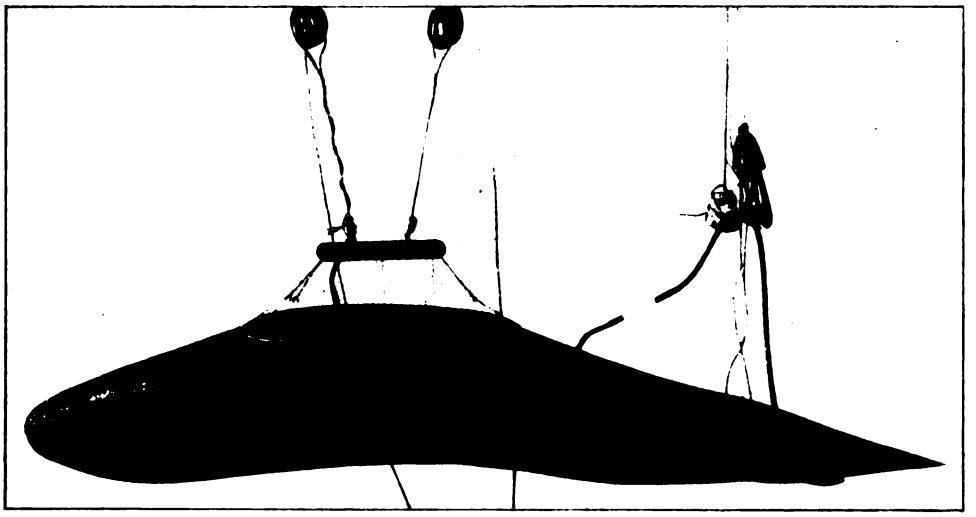


Fig. 1.

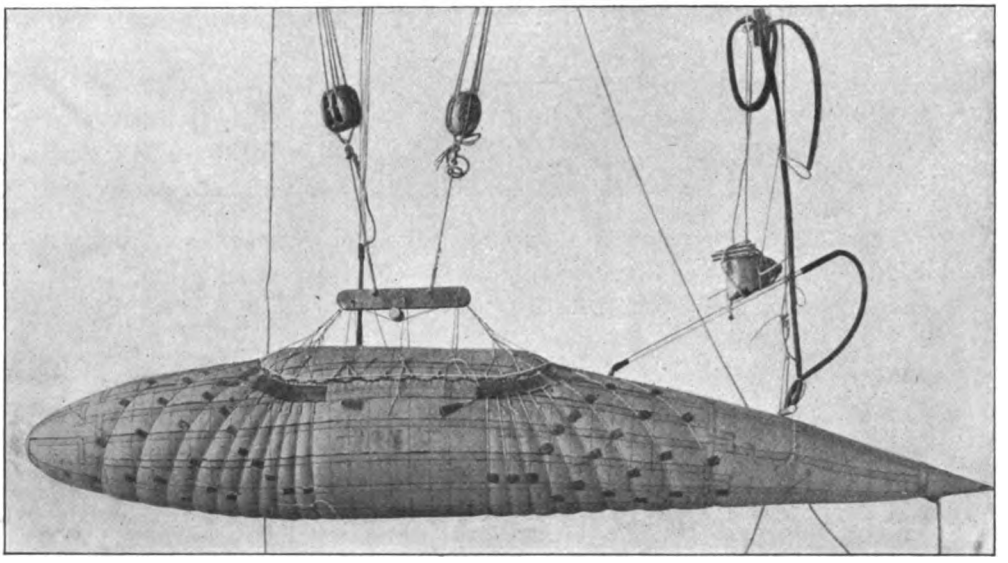


Fig. 2.

treten. Aber wenn man bedenkt, daß in diesen Stellen die Durchmesser umso kleiner sind, je spitzer die Form ist, so erscheint es ausgeschlossen, daß die Spannungen in der Hülle die erlaubte Grenze überschreiten.

2. Die Takelung konnte durch den patentierten Liektrossengurt erheblich vereinfacht und zugleich bedeutend verstärkt werden. Der Liektrossengurt hat

Digitized by Google

nämlich den Vorzug, daß man in der Einteilung der Angriffspunkte der Takelung an den Gurt an eine bestimmte Entfernung nicht gebunden ist. Man wird daher diese möglichst groß machen und kann dadurch die Anzahl der Leinensysteme so weit herabdrücken, als dies hinsichtlich anderer Rücksichten irgend zulässig erscheint. In Verbindung mit den im folgenden beschriebenen, ebenfalls patentierten Trajektorien stellt der Liektrossengurt eine äußerst solide Verbindung dar. Während der ½ jährigen Praxis mit diesem Gurt hat sich noch nie ein Mißstand herausgestellt, während die früheren Gurte mit einzelnen aufgenähten Schlaufen bei größeren Schiffen nicht mehr ein absolut zuverlässiges Konstruktionsglied darstellten.

3. Die Trajektoriengurte quer über den Rumpf der Hülle sind in solche Linien gelegt, in deren Richtung die größten Spannungen, mithin auch die größten Dehnungen stattfinden. In der Festigkeitslehre nennt man diese Linien Spannungstrajektorien. Gurte, die, nach diesem Gesetz verlaufend, den Rumpf wie ein Netz umgeben und zum größten Teil im Takelungsgurt münden, stellen gewissermaßen die Fortsetzung der Takelung dar über eine Fläche, die den Überschuß an Spannungen oder, kurz gesagt, den Auftrieb liefert. Die beiden Bilder in Fig. 1 und Fig. 2, die ein und dasselbe wassergefüllte Versuchsmodell, einmal ohne und einmal mit Trajektorien darstellen, zeigen, wie gut die Wirklichkeit sich mit den theoretischen Erwägungen deckt. Die Trajektorien zwingen die Deformation des Körpers in die gewünschte Form, d. h. sie lassen den Körper sich ruhig deformieren, aber so, daß er gerade bleibt.

Ist man einmal überzeugt von der Wirkungsweise der Trajektorien, so wird man einsehen, daß der Takelungsgurt, vornehmlich in der vorhin beschriebenen Gestalt, nun nicht mehr über die ganze Schiffslänge ausgebreitet zu werden braucht, sondern in ein ziemlich enges Gebiet eingeschlossen werden kann. Da nun die Trajektorien, wenn sie wirklich helfen sollen, aus starken Gurten bestehen müssen, so ergibt es sich von selbst, daß sie eine zweckmäßige Verstärkung der Hülle bilden. Zweckmäßig insofern, als sie sich dort am meisten häufen, wo die höchsten Spannungen auftreten. Sie werden außerdem gleich so stark gemacht, daß, wenn die Hülle einen Riß bekommt, selbst wenn sich dieser auf 2 Trajektorienabstände erstreckt, ein Weiterreißen nicht stattfindet.

Den einen Übelstand der Trajektorien, und zwar den durch die Einschnürungen hervorgerufenen größeren Luftwiderstand, wird man wohl in Kauf nehmen können, denn nach gemachten Vergleichsmessungen beträgt die Differenz in der Geschwindigkeit 0,1—0,2 m/sec bei großen Schiffen. Beiläufig sei erwähnt, daß an wirklichen Ballonen die Einschnürungen lange nicht so ausgeprägt sind wie am Versuchsmodell in Fig. 2, denn hier galt es ja, alle Erscheinungen möglichst übertrieben hervortreten zu lassen.

4. Um in Fahrt das Einbeulen der vorderen Spitze der Hüllen zu verhindern, ist eine aus Rohren bestehende Versteifung geschaffen worden, die sich sehr gut bewährt hat und nicht viel wiegt.

Auch sonst sind viele Einzelheiten in der Konstruktion und Konfektion der Hüllen auf Grund von eingehenden Versuchen verbessert worden. Und dank der Bereitwilligkeit und dem Interesse der Ballonfabriken ist es gelungen, den Hüllenbau so weit gebracht zu haben, daß er seinen Aufgaben vollauf gerecht wird.

Digitized by Google

b) Die neueren Gondeltypen der Parseval-Luftschiffe.

Von

Ing. **Blochmann**-Bitterfeld.

Die Luft-Fahrzeug-Gesellschaft m. b. H., Bitterfeld, baut zurzeit zwei Gondeltypen, eine nicht schwimmbare Type für kleinere Schiffe bis zu 400 PS, welche jedoch auf besonderen Wunsch auch für Schwimmbarkeit eingerichtet werden kann, und eine schwimmbare Type, mit welcher das Schiff sowohl auf Wasser als auch auf Land niedergehen kann. Letztere wird mit Motoren bis zu einer Gesamtleistung von 800 PS ausgerüstet. Für noch größere Leistungen kommen Zweigondelschiffe in Frage, bei denen jede Gondel 500 PS und darüber erhält.

Die **nicht schwimmbaren Gondeln** sind in den tragenden Teilen vollständig aus Stahl hergestellt unter Vermeidung jeglichen Holzes (wie bei ausländischen Schiffen häufig). Durch die Verwendung von kaltgezogenen Stahlrohren ist die denkbar größte Sicherheit gegen Bruch vorhanden, da dieses Material durch die Herstellungsart größere Gleichmäßigkeit in der Struktur besitzt als Holz. Sämtliche Verbindungen sind unter Verwendung von Tiegelstahlgußmuffen hart gelötet unter Ausschluß jeglicher Schweißung. Eine Schweißung bietet nie die Sicherheit einer Lötung, da das Material flüssig wird und allzuleicht von dem Arbeiter verbrannt werden kann. Der Vorteil der Schweißung liegt in der großen Billigkeit und Einfachheit der Verbindungen sowie in einer Ersparung von Gewicht, der Nachteil in der geringen Sicherheit und der Abhängigkeit vom Arbeiter. Die hartgelöteten Verbindungen besitzen stets mindestens die Festigkeit des stärksten Rohres hinter der Lötstelle. Für besonders hochbeanspruchte Teile werden Profile und Rohre aus Chromnickelstahl verwandt.

Ein Hauptvorteil dieser Gondel ist die leichte Zerlegbarkeit für den Bahntransport; die kürzeren Gondeln werden in zwei, die längeren in drei Teile zerlegt. Beim Bau dieser Gondeln hat sich eine gewisse Standardtype ergeben. Von vorn beginnend, zeigt die Gondel folgende Felder:

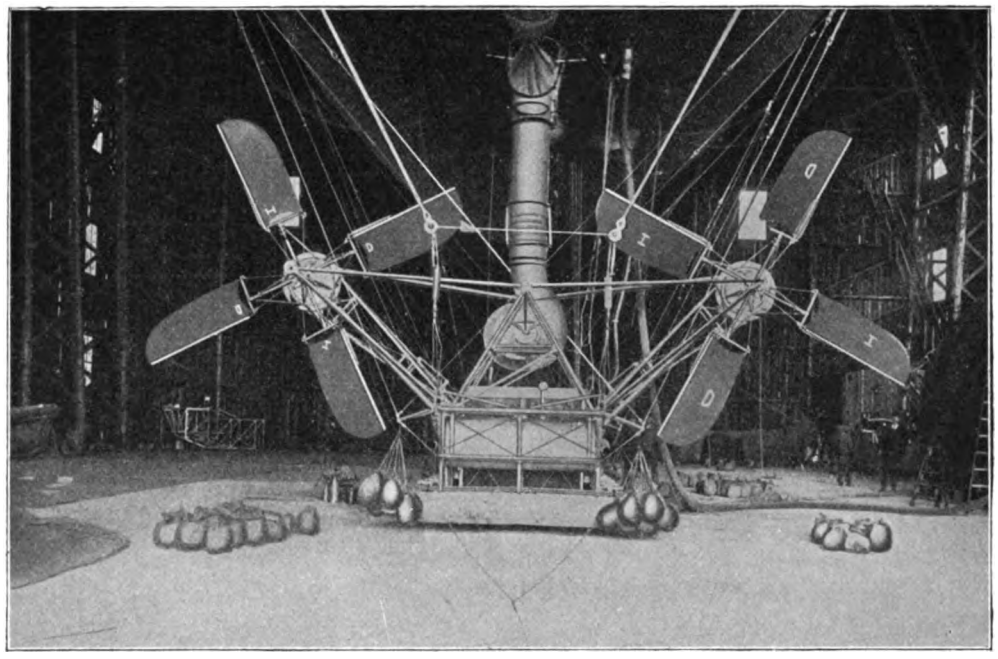
1. Feld für Schlepptau und Fangleine,
2. Feld für Wasserballast,
3. Feld für Führer, Höhensteuermann und Seitensteuermann,
4. Feld für Passagiere,
5. Feld für Passagiere oder bei Kriegsschiffen für Funkenkabine,
6. Feld für Benzin,
7. Feld für Maschinisten,
8. Feld für zwei nebeneinanderliegende Motoren und Bedienungsgang in der Mitte,
9. Feld für untere Getriebe,
10. Feld für Kühler,
11. Feld für Benzin,

bei größeren Schiffen noch

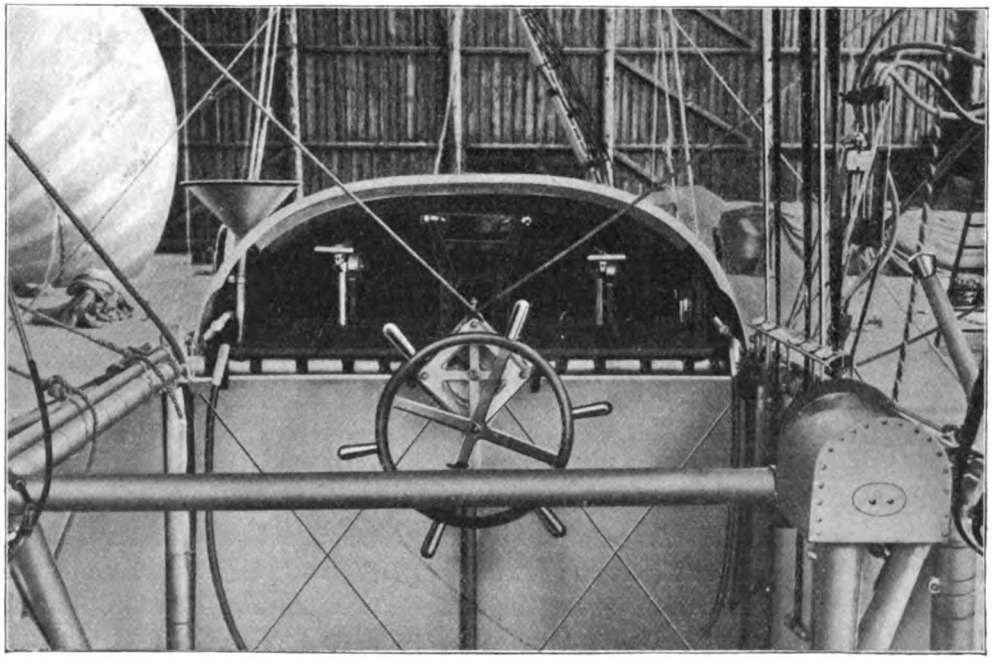
12. Feld für Wasserballast.

Der Führerstand und Passagierraum ist bei den neueren Gondeln vollständig geschlossen; reichlich große Fenster gestatten einen unbehinderten

Digitized by Google



Propellerpaar eines modernen Parseval-Luftschiffes.



Führerstand eines Parseval-Luftschiffes.

Digitized by Google

Ausblick. Die Seitensteuerzüge sind so verlegt, daß sie die Aussicht nach vorn in keiner Weise hindern, was vornehmlich für Peilungen von Vorteil ist. Die neuen Kompasse sind sämtlich mit D-Kompensation ausgerüstet und mit abblendbarer Beleuchtung versehen. Zu den Flüssigkeitsmanometern ist als Kontrollinstrument ein Membrandruckmesser hinzugekommen, der infolge seiner großen Skala ein recht bequemes Ablesen des jeweiligen Druckes gestattet. Die neuen Schiffe mit nicht schwimmbaren Gondeln sind mit zweifacher Höhensteuerung ausgerüstet, mit der bewährten Ballonetsteuerung und der Steuerung mittels maschineller Gondelverschiebung nach D. R. P. 255 844 oder statt letzterer auch Flächensteuerung. Die Betätigung der ersteren erfolgt durch einen Hebel, die der letzteren durch ein Handrad, beide auf Steuerbordseite.

Die Maschinenanlage steht im Zeichen ständiger Erhöhung der Motorkräfte zwecks Erreichung einer immer höheren Schiffsgeschwindigkeit. Während vor einigen Jahren noch Motoraggregate von 70 bis 100 PS eingebaut wurden, ist man heute bereits dazu übergegangen, bis zu 200 PS starke Maschinen zu verwenden. In der Maschinenanlage hat sich im Laufe der Zeit eine gewisse Norm herausgebildet, die sich für Parsevalschiffe als die zweckmäßigste erwiesen hat: bei Zweimotorengondeln beide Maschinen nebeneinander, bei Viermotorengondeln je zwei neben- und hintereinander. Die Kraftübertragung auf die Propeller gestaltet sich folgendermaßen:

Das vom Motor abgegebene Drehmoment wird durch eine Kupplung und Knochengelenk- oder Knüppelwelle auf das untere Getriebe übertragen. Hier wird die Kraft durch Kegelräder auf die Kardanwelle und wieder durch ein Paar Kegelräder des oberen Getriebes auf die Propellerwelle geleitet.

Als Motoren werden ausschließlich Fabrikate allererster Firmen verwendet, welche eine Gewähr für absolute Zuverlässigkeit bieten. Jeder Motor muß sich vor dem Einbau einer 8÷15 stündigen Bremsprobe unterwerfen, bei welcher Leistung, Tourenzahl, Benzin- und Ölverbrauch genau festgestellt werden.

Die Kupplung ist eine einfache entlastete Lederkonuskupplung und derart konstruiert, daß sowohl im eingerückten wie im ausgerückten Zustande keine achsialen Drücke auf die Motorkurbelwelle oder Kupplungsbetätigung kommen. Der Motor kann also beliebig lange leer laufen, ohne daß eine Erwärmung der Kupplung eintritt. Das Nachstellen geschieht innerhalb weniger Minuten ohne Ausbau irgendwelcher Teile.

Alle Knüppelwellen sind aus dem besten im Handel erhältlichen Stahl angefertigt und die Knüppel selbst gehärtet.

Das untere Getriebe enthält bei den Zweimotorengondeln 3 Kegelräder oder, als Reversiergetriebe ausgebildet, 4 Kegelräder; bei der Viermotorengondel hat es stets 4 Räder. Alle rotierenden Teile laufen auf Kugellagern, welche ihrerseits durch Umlaufschmierung zusammen mit den Lagern des oberen Getriebes unter Druck geölt werden. Die Kegelräder sind in einfacher Weise ohne Ausbau von Teilen nachstellbar. Jedes Aggregat, Motor, Kupplung oder Getriebe, kann einzeln leicht ausgebaut werden. B. B.- und St. B.-Getriebe sind durch eine Zwischenwelle miteinander verbunden, um eine vollkommen gleiche Tourenzahl beider Propeller zu erreichen. Jeder Motor kann einzeln beide Propeller antreiben; bei

Digitized by Google

Beschädigung eines Propellers kann nach Ausschalten der Kardanwelle mit dem anderen Propeller weitergefahren werden. Das Herausnehmen der Kardanwelle kann während der Fahrt vor sich gehen.

Die Verbindungswellen zwischen dem unteren und oberen Getriebe, die sogenannten Kardanwellen, sind als Knüppelwellen ausgebildet und bei größeren Längen in der Mitte durch ein Kugellager unterstützt.

Die oberen Getriebe haben stets 2 Kegelräder, welche gleich den übrigen auf Kugellagern laufen; zur Aufnahme des Achsialschubes der Propeller enthalten sie kräftig bemessene, doppeltwirkende Druckkugellager.

Als Propeller gelangen je nach Wunsch die patentierten von der Gondel aus in der Steigung einstellbaren Stahlblechpropeller oder Holzpropeller mit unveränderlicher Steigung zur Anwendung. Bei den ersteren wird der Schub für die Rückwärtsfahrt durch Änderung der Steigung bei gleicher Drehrichtung, bei den letzteren durch Änderung der Drehrichtung bei gleicher Steigung erreicht. Vorteil der ersteren Art des Umsteuerns ist, daß ohne Auskuppeln des Motors auf Rückwärtsgang umgeschaltet werden kann.

Neben dem Propellerantrieb ist der Ventilatorantrieb betriebssicherer gestaltet worden. Die Zweimotorenschiffe sind mit einem Ventilator ausgerüstet, welcher von beiden Motoren einzeln oder zusammen mittels Riemen und Freilauf angetrieben werden kann. Bei den Viermotorengondeln sind 2 Ventilatoren vorgesehen, welche einzeln oder zusammen von jedem der 4 Motoren angetrieben werden können. Die Ventilatoren sind genügend groß, um das Schiff bei einer Fallgeschwindigkeit von 3 m/sec noch prall zu halten.

Jeder Motor hat seinen eigenen Kühler; beide Kühler stehen nebeneinander, und vor denselben arbeitet ein Ventilator, welcher zur Verstärkung der Kühlwirkung Luft durch die Kühler drückt. Dieser Kühlerventilator, dessen Flügel früher aus Blech bestanden, ist bei den neueren Schiffen aus Holz gearbeitet, wodurch ein besserer Wirkungsgrad erzielt wurde.

Der Fußboden ist aus Aluminiumblech hergestellt, da Holzfußboden im Maschinenraum durch Aufsaugen von Öl in kurzer Zeit sehr schwer wird.

Sämtliche Öl-, Benzin- und Wasserballastbehälter haben Inhaltsanzeiger, welche ein bequemes Ablesen des Vorrats gestatten.

Zur Übermittlung von Befehlen zwischen Führer und Bedienungspersonal dient ein Maschinentelegraph und ein Sprachrohr.

Bei Schiffen ohne Gondelverschiebungs-Höhensteuerung ist eine Gondelbremse eingebaut, welche verhindert, daß die Gondel auf den Laufseilen mit zu großer Geschwindigkeit gleitet, und die sich besonders bei böigem Wetter sehr gut bewährt hat.

Hilfsmaschinen wie Funkentelegraphie-Dynamomaschine, Lichtmaschine sind bequem zugänglich angeordnet, die erstere außerdem regendicht eingekapselt.

Die an jede dieser Gondeln anbringbare Schwimmvorrichtung besteht aus drei zylindrischen Stoffkörpern, welche durch Luft auf einen Innendruck von etwa 100 mm Wassersäule gebracht werden. Überdruckventile sind nicht vorhanden, dagegen ist der Stoff so stark gewählt, daß er den selbst bei Höhenfahrten bis zu 3000 m auftretenden inneren Überdruck noch mit Sicherheit aushält.

Digitized by Google

Es braucht hierdurch beim Niedergehen aus dieser Höhe nicht Luft nachgefüllt zu werden, was beim Vorhandensein von Überdruckventilen geschehen müßte. Die Schwimmkörper können für Landfahrten abmontiert werden.

Beim Bau dieser Gondeln wurde Hauptgewicht auf Dauerhaftigkeit bei scharfen Landungen ohne Hilfsmannschaften und leichte Demontierbarkeit zwecks Transports auf gewöhnlichen Wagen gelegt, ohne daß darunter natürlich die Betriebssicherheit leidet.

Die **schwimmbaren Gondeln** sind unten als Bootskörper ausgebildet mit aufgesetzter vollständig geschlossener Kabine, auch für den Maschinenteil der Gondel. Als Baumaterial kommt hierbei eine Aluminiumlegierung mit sehr hohen Festigkeitseigenschaften in Frage. Von der Rohrkonstruktion ist man ab- und zur Blechplattenkonstruktion übergegangen. Diese Gondeln sind mit derselben Sicherheit gebaut und bieten bei gleichen Längenabmessungen erheblich mehr Raum für Führer, Passagiere und Bedienungspersonal. Dies wird dadurch erreicht, daß Betriebsstoff und Ballast nicht mehr auf, sondern unter dem Fußboden im Bootskörper selbst untergebracht werden. Wie schon eingangs erwähnt, sind diese Gondeln im allgemeinen für größere Leistungen bestimmt und mit vier 180- bis 200-PS-Motoren ausgerüstet. Die Anordnung der Maschinen und Propeller ist im wesentlichen die gleiche wie bei der vorher beschriebenen Type. Es werden nur Holzpropeller eingebaut, und ist daher das untere Getriebe als Reversiergetriebe ausgebildet.

Zum Prallhalten des Ballons sind 2 Ventilatoren, welche oben außerhalb der Kabine angebracht sind und ihrer Fördermenge nach mit dem Inhalt des Ballons im Einklang stehen, angeordnet. Es kann jeder Ventilator von jedem Motor einzeln sowie auch beide Ventilatoren zusammen angetrieben werden, so daß alle Kombinationen möglich sind. Ein- und Ausrückung der Gebläse erfolgt durch Lederkonuskupplungen.

Anders angeordnet ist ferner die Brennstoffzuführung zu den Motoren. Bisher wurde jeder Motor aus den Hauptbehältern direkt gespeist; für das Anlassen wurden diese Behälter mittels einer Handluftpumpe unter Druck gesetzt, während im Betrieb eine am Motor befindliche Pumpe das Benzin aus dem Behälter heraussaugte und dem Motor zuführte. Bei der neuen Anordnung wird der Brennstoff durch eine vom Motor betriebene Pumpe erst in einen bei allen Schräglagen des Schiffes höher gelegenen Zwischenbehälter gefördert, aus welchem es allen Motoren unter Gefälle zufließt; zum Anlassen ist eine von Hand zu betätigende Pumpe vorgesehen, mittels welcher ein kleines Quantum Benzin in den Zwischenbehälter gefördert wird.

Die Kühler liegen außerhalb der Kabine im Fahrwind und sind der Form der letzteren angepaßt.

Die Schiffe mit einer Gondel dieser Bauart haben eine aus Gondelverschiebung, Flächensteuerung und Ballonetsteuerung kombinierte, diejenigen mit zwei Gondeln eine aus Gondelverschiebung und Flächen kombinierte Höhensteuerung ohne Ballonetsteuerung.

Sämtliche Luftein- und auslaßorgane arbeiten automatisch; dieselben sind von einem am Ballon befindlichen Laufsteg aus während der Fahrt zugänglich.

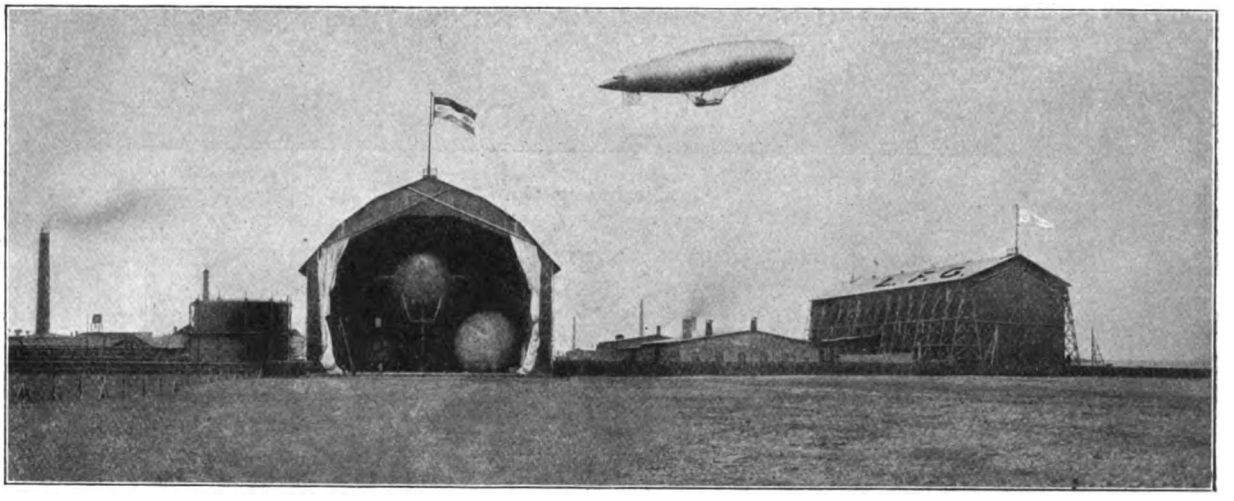
Digitized by Google

Bei diesen größeren Schiffen, die für ausgedehnten Fahrten bestimmt sind, ist Hauptaugenmerk auf Bequemlichkeit der fahrenden Personen, Schutz vor Wind und Regen und möglichst hohen Nutzauftrieb bei hoher Geschwindigkeit gerichtet.

---

6. Die Werft der Parseval-Luftschiffe in Bitterfeld.

Das Grundstück der Werft umfaßt einen Flächenraum von ca. 20,80 ha. Auf diesem Grundstück befinden sich zwei Luftschiffhallen, deren größere 80 m lang, 25 m hoch und 33 m breit ist. Sie wird jetzt auf 100 m verlängert und bietet dann Raum für Parseval-Luftschiffe größter Abmessungen, während die andere Halle 75 m lang, 22 m hoch und 25 m breit ist und Schiffen von mittleren und kleinen Abmessungen Unterkunft bietet. Beide Hallen stehen in der ungefähren Richtung



Werft- und Luftschiffhallen in Bitterfeld.

Ost-West. Auf den Dächern befinden sich Plattformen mit Vorrichtungen für die Messung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Beiden Hallen wird das in dem Bitterfelder Werke II der chemischen Fabrik Griesheim-Elektron erzeugte Wasserstoffgas durch unterirdische Leitungen, entweder aus dem benachbarten Gasometer oder direkt aus der elektrolytischen Anlage des Werkes zugeführt. Jede Halle besitzt elektrische Beleuchtung, Wasserleitung und stationäres Gebläse. Zwischen beiden Hallen liegt das massive Betriebsgebäude. Dieses enthält im unteren Stock eine Anzahl Bureau- und Zeichenräume. Aus einem dieser letzteren gelangt man in einen sehr geräumigen Montageraum, an welchen sich die Schmiede anschließt. Diese Räume sind mit den modernsten Spezialmaschinen usw. ausgestattet. Im oberen Geschoß des Betriebsgebäudes befinden sich: Eine Lichtpausanstalt, große Modellräume, ein photographisches Atelier usw. In Anbauten

Digitized by Google

Stahlrohrmagazin.

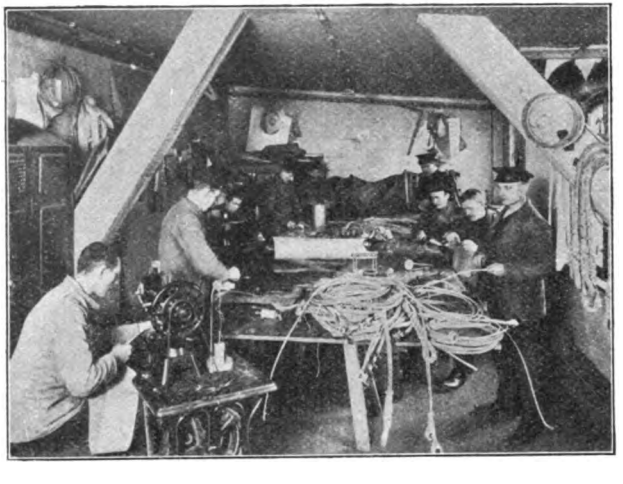
Ballonmaterial-Magazin.

Digitized by Google

Betriebsb ureau.

Konstruktionsbureau (Gondelbau).

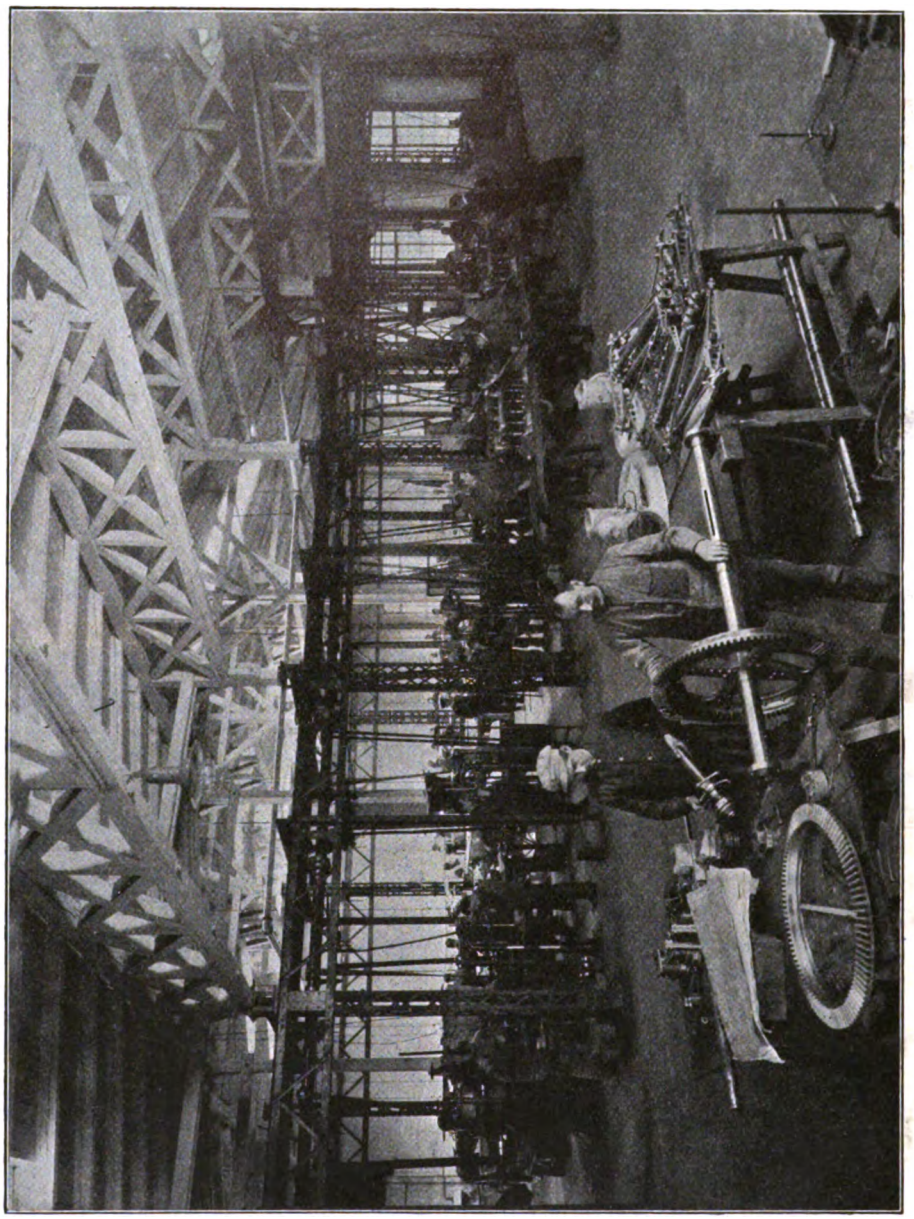
Konstruktionsbureau (Hüllenbau).



Sattlerwerkstatt.

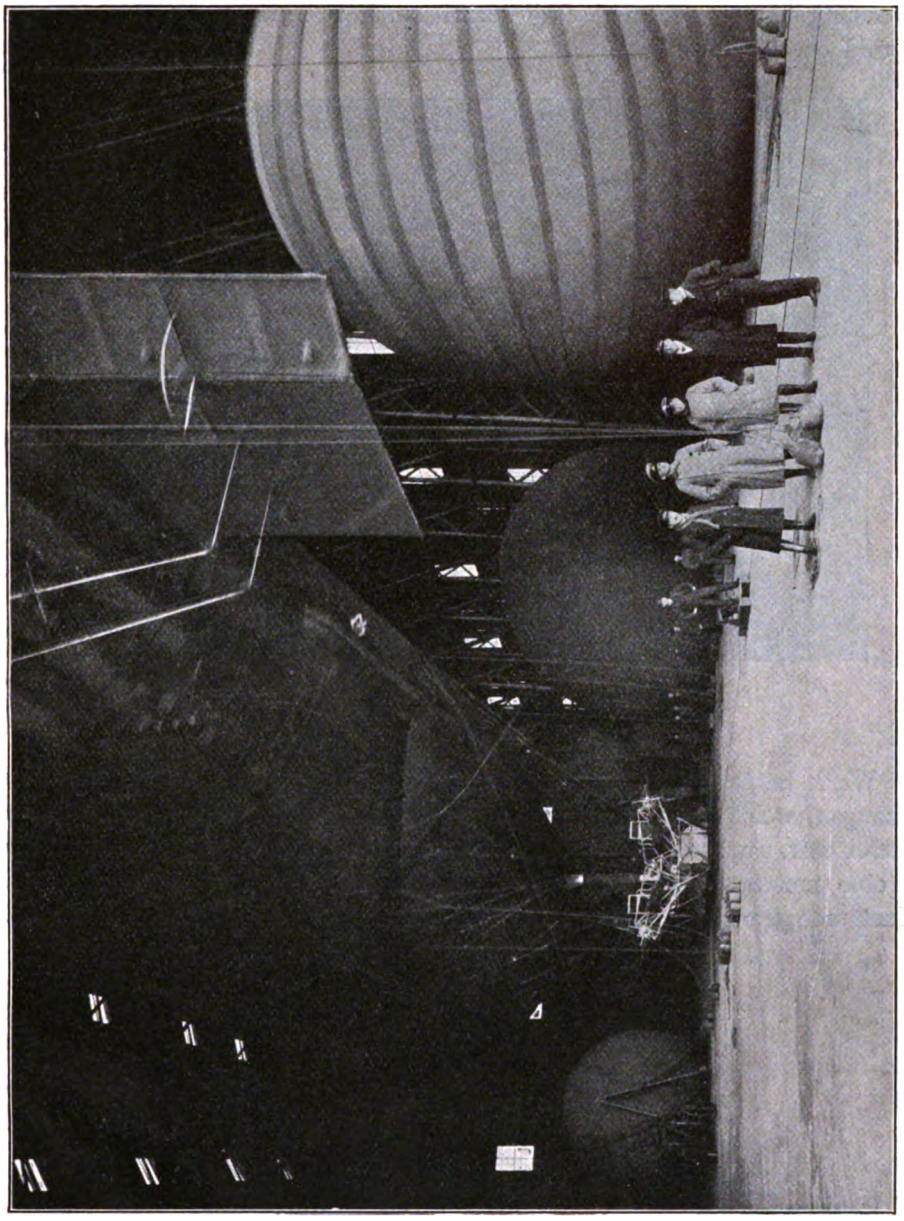
Meteorologische Instrumente.

Digitized by Google



Werkstatt für Gondelbau.

Digitized by Google



Fertig montiertes Luftschiff in der Halle.

Digitized by Google

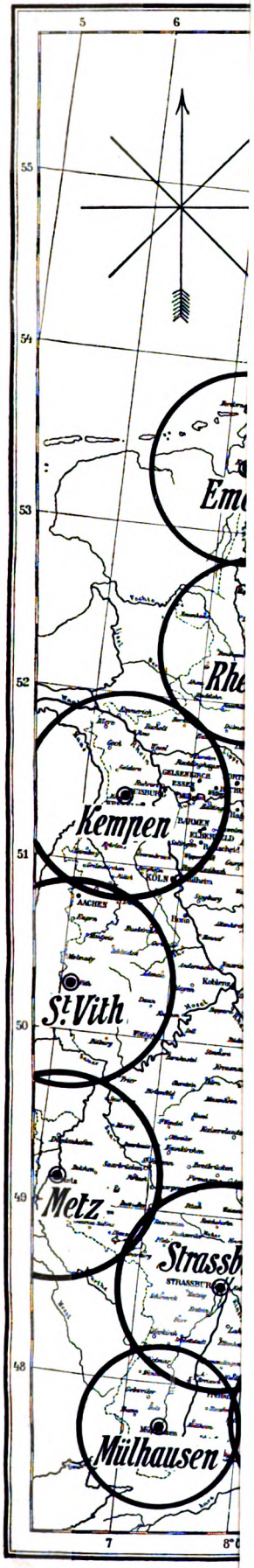
der kleinen Halle befinden sich die Schreiner- und Sattler-Werkstatt sowie Beamtenwohnungen. Auf dem Landungsplatze ist ein schwerer Anker eingegraben, der für die größten Luftschiffe aller Systeme ausreicht. Die Werft, welche von einem Oberingenieur geleitet wird, beschäftigt zurzeit ca. 30 technische und kaufmännische Beamte und ca. 100 Arbeiter.

Montageraum für die Gondeln.

Das Werk hatte außerdem schon mehrfach Gelegenheit, Reparaturen usw. an Flugzeugen, welche den Luftschiffhafen anliefen, auszuführen, sowie diese mit Brennstoffen usw. usw. zu versehen. Der Werft ist endlich unter Leitung eines Fachmannes eine meteorologische Station angeschlossen, welche mit allen erforderlichen Instrumenten ausgestattet ist und einen ständigen Wetterdienst unterhält.

DEC 9 1920

Digitized by Google



Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

-62
UNIVERSITY OF MICHIGAN
3 9015 02022 8535

Digitized by Google

Digitized by Google